

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

Теплоенергетичний факультет

Кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів і систем

"На правах рукопису"
УДК 532.526

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
О.В. Коваль
(підпис) (ініціали, прізвище)
“ ” _____ 2018р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності – 121 Інженерія програмного забезпечення
за спеціалізацією - Програмне забезпечення розподілених систем
на тему: «Моделювання процесів перемішування рідин вихровими структурами в колі»

Виконав (-ла): студент (-ка) 6 курсу, групи ТВ-371мп
Кошлатий Микола Леонідович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник д. ф.-м. н, проф. Гуржій О. А.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент пров.н.с., д.т.н. Воскобійник В. А.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ - 2018

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського”**

Факультет теплоенергетичний

Кафедра автоматизації проектування енергетичних процесів і систем

Рівень вищої освіти другий, магістерський

зі спеціальності - 121 Інженерія програмного забезпечення

за спеціалізацією - Програмне забезпечення розподілених систем

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Коваль О.В.
(прізвище, ініціали) _____ (підпис)
« ____ » _____ 2018р.

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ**

Кошлатому Миколі Леонідовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Моделювання процесів перемішування рідин вихровими структурами в колі

Науковий керівник Гуржій Олександр Андрійович д. ф.-м. н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету № ____ від “ ____ ” _____ 20 ____ року

2. Строк подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження інформаційні технології моделювання процесів перемішування рідини

4. Предмет дослідження інформаційні технології перемішування рідини системою локалізованих вихрових структур у круговій площині

5. Перелік питань, які потрібно розробити

1) проаналізувати особливості моделювання процесів перемішування рідини;

2) проаналізувати актуальні завдання для систем з присутнім перемішуванням рідини в круговій площині за допомогою вихрових структур;

3) розробити алгоритмічну модель для розв'язання задачі пошуку областей з інтенсивним перемішуванням рідини системою вихорів в круговій площині;

4) розробити програмне забезпечення для моделювання процесів перемішування рідин вихровими структурами з можливістю ідентифікації областей з інтенсивним режимом перемішування.

6. Орієнтований перелік ілюстративного матеріалу _____

- 1) Математична модель
- 2) Етапи роботи з програмою
- 3) Функції програмного забезпечення
- 4) Структура програмного забезпечення
- 5) Інтерфейс
7. Орієнтований перелік публікацій
- 1) Кошлатий М.Л., Гуржій О.А. “Проблематика досліджень хаотичних рухів у суцільних середовищах”

8. Дата видачі завдання « 30 » травня 2017 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строки виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Отримання завдання	30.05.17р.	
2	Збір інформації	01.06.17р. – 14.06.17р.	
3	Аналіз вимог завдання, вибір методів і засобів розв’язання поставленої задачі	14.06.17р. – 02.09.17р.	
4	Підготовка публікацій	25.11.18р.	
5	Підготовка доповідей на конференції	25.11.18р.	
6	Підготовка дисертації	03.09.18р. – 06.12.18р.	
7	Розробка програмного продукту	03.09.18р. – 21.10.18р.	
8	Захист програмного продукту	22.10.18р.	
9	Передзахист	26.11.18р.	
10	Захист	19.12.18р.	

Студент

(підпис)

Кошлатий М.Л.

(прізвище та ініціали)

Науковий керівник

(підпис)

Гуржій О. А.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Структура й обсяг дипломної роботи

Магістерська дисертація складається із вступу, 4 розділів, висновку, переліку використаної літератури з 40 найменувань, 2 додатки і містить 38 рисунків, 22 таблиці, 42 формули. Загальний розмір магістерської дисертації становить 107 сторінок, де перелік використаної літератури займає 4 сторінок, додатки – 6 сторінок.

Актуальність теми. На сьогоднішній день на процеси перемішування рідин, що спричинені різними течіями звертається особлива увага, зокрема питанням прогнозу розповсюдження нафтових плям під час забруднень, розподілення забруднень і відходів у водоймах. Найбільш гостро перед дослідниками стоїть питання збільшення ефективності процесу перемішування – знаходження так званих областей інтенсивного перемішування, що здатні виникати за повільних рухів суцільного середовища. Аналіз сучасної наукової літератури вказує, що найбільш ефективно перемішування можна отримати в системах, що характеризуються нестійким розвитком із плином часу. У гідродинамічних системах, для яких властива дана нестійкість, часто виникає хаотичний рух рідини. Оскільки на сьогоднішній день не існує універсальної методики визначення хаотичності руху рідин, постає актуальна задача проектування програмного забезпечення для ідентифікації областей з інтенсивним перемішуванням в рідині з різними течіями.

Мета дослідження полягає в проектуванні програмного продукту, що матиме змогу моделювати двовимірний рух нестислої рідини у круговій площині в полі швидкості, спричинений системою локалізованих вихрових структур. Необхідно обчислювати та будувати критерії, за допомогою яких можливо ідентифікувати області інтенсивного перемішування у заданому полі швидкості течії.

Із метою виконання поставленої задачі було сформульовано наступні **завдання дослідження**:

- виконати аналіз процесів перемішування рідини вихоровими структурами у круговій площині й існуючих критеріїв ідентифікації хаотичних рухів рідини у ній;
- виконати аналіз існуючих програмних рішень пошуку областей хаотичного перемішування рідини вихорами у круговій площині;

- визначити особливості критеріїв визначення областей з інтенсивним перемішування та розробити алгоритм пошуку областей інтенсивного перемішування рідини системою вихорів всередині кругової площини;

- розробити програмне забезпечення для моделювання потоків скалярних полів у рідині всередині кругової площини можливістю ідентифікації областей інтенсивного перемішування.

Об'єктом дослідження є комп'ютерні інформаційні технології моделювання процесів перемішування рідини.

Предметом дослідження інформаційні технології перемішування рідини системою локалізованих вихрових структур у круговій площині.

Методи дослідження. Розв'язання поставлених задач виконувалося за допомогою наступних методів:

- чисельний метод Рунге-Кутта для розв'язання задачі Коші для систем диференціальних рівнянь;

- метод реалізації побудови перетину Пуанкаре у фазовому просторі для рідкої частинки всередині кругової порожнини у полі швидкості системи точкових вихорів.

Наукова новизна одержаних результатів. Найсуттєвішими науковими результатами магістерської дисертації стало:

- удосконалено спосіб визначення інтенсивних режимів перемішування рідини в процесі перемішування двовимірними течіями нестислої рідини за рахунок комплексного аналізу критеріїв для ідентифікації областей хаотичного руху рідких частинок, що призвело до збільшення ефективності ідентифікації областей інтенсивного перемішування і їхньої локалізації у розглянутій течії;

- набуло подальшого розвитку застосування технології пошуку областей інтенсивного перемішування рідини системою вихорів у внутрішніх течіях.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає в розробленому програмному застосунку, що дозволяє дослідити наявність областей інтенсивного перемішування рідини у внутрішніх течіях.

Ключові слова. МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕМІШУВАННЯ РІДИНИ, ІНТЕНСИВНЕ ПЕРЕМІШУВАННЯ, ВИХОРОВА ДИНАМІКА.

ABSTRACT

Structure and volume of the dissertation

The master's dissertation consists of an introduction, 4 sections, a conclusion, a list of used literature from 40 titles, 2 appendixes and contains 38 figures, 22 tables and 42 formulas. The total size of the master's dissertation is 107 pages, where the list of used literature takes 4 pages, appendixes - 6 pages.

Significance of the topic. Nowadays, high attention is paid to the process of mixing liquids, caused by different streams, in particular the problem of the propagation of oil spills during pollution, distribution of contaminants and waste in reservoirs. At the same time, these questions are being addressed by researchers and engineers in such industries as pharmaceuticals, construction, food industry, and the like. Most acutely to researchers is the question of increasing the effectiveness of the mixing process – the creation of so-called areas of intense mixing. From scientific sources it is known that the most effective mixing can be obtained in systems where there is a chaotic motion of the liquid. Since today there is no universal method for determining the chaotic motion of liquids, the urgency of the problem of designing the identification system of areas with intensive mixing in a liquid with different currents appears.

The **objective** of the topic is to design a software product that will be able to reproduce fluid behavior in a circular plane in which mixing is caused by a vortex system. Also, this system must calculate and construct the criteria by which it will be possible to find areas for intensive fluid mixing.

In order to accomplish this task, the following **research objectives** were formulated, which gave the direction of the study and its structure:

- to carry out an analysis of the processes of mixing the liquid with vortex structures in a circular plane and the existing methods of identifying chaotic movements in it;
- to carry out the analysis of existing software solutions for the search for areas of chaotic mixing of liquid with vortices in a circular plane;
- determine the criteria for determining regions with intensive mixing and the development of an algorithmic model for the simulation of processes in a liquid with a vortex system inside a circular plane;

- develop software for simulating fluid flows in a circular plane with a vortex system and the ability to identify regions of intense mixing.

The **object** of the exploration computer information technology simulation of fluid mixing processes.

The **subject** of the exploration is processes of mixing liquid with vortices in a circular plane.

Exploration methods. Solution of defined goals was made with usage of next methods:

- numerical Runge-Kutta method for solving the Cauchy problem for systems of differential equations;
- method for calculating the point vector vortex path on a circular plane based on the Helmholtz theorem.

Scientific novelty of the results. The most significant scientific results of the master's thesis became:

- the method of calculating the trajectories of liquid particles in the process of mixing has been improved due to the reduction of the problem to the Cauchy problem with the integral parameters of the previous coordinates and the vortex intensity, which led to a decrease in the computational volumes for the calculation of the following coordinates of the particles;

- has further developed the application of technology to search areas of intensive fluid mixing system of vortices.

Key words. MODELING OF LIQUID MEMBRANES, INTENSIVE MIXTURES, VORTEX DYNAMICS.

ЗМІСТ

Вступ	10
1. Огляд і проблематика теорії хаотичної динаміки	12
1.1. Властивості хаотичних систем.....	13
1.2. Хаотична динаміка у рідких середовищах.....	18
1.3. Властивості вихрових структур	25
1.4. Особливості взаємодії всередині систем декількох вихорів.....	30
Висновки до розділу 1	35
2. Алгоритмічна модель системи ідентифікації інтенсивного перемішування рідини	36
2.1. Обґрунтування критеріїв ідентифікації хаотичних станів руху	37
2.2. Обґрунтування обраних характеристик для конфігурування моделі.....	43
2.3. Алгоритм чисельного вирішення задачі Коші.....	47
Висновки до розділу 2	53
3. Опис програмної реалізації системи моделювання процесів перемішування рідини вихровими потоками на круговій площині	54
3.1. Функціональність системи	54
3.2. Архітектура програмного продукту	58
3.3. Структура програмної системи.....	61
3.4. Програмні засоби реалізації	63
3.5. Методика роботи користувача з програмою	66
Висновки до розділу 3	73
4. Розробка стартап-проекту	74
4.1. Опис ідеї проекту	75
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту	78
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	79
4.4. Аналіз ринкової стратегії проекту	87
4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	90
Висновки до розділу 4.....	94
Висновки	95

Список використаних джерел	97
Додаток А.....	101
Додаток Б	105

ВСТУП

Сучасний стан розвитку науки і техніки, стрімко зростаючі обсяги виробництва промисловості та споживання населенням визначають високий рівень приділеної уваги до екології а також до суміжних з нею проблем. Зокрема, на сьогоднішній день активно ведуться дослідження з питань перемішування рідин у різних середовищах (наприклад переміщення нафтових плям на поверхні океану, спостереження за рухом планктонної маси, тощо) [1, 2]. У той же час прогнозування та контроль процесів перемішування рідин є актуальним завданням для багатьох науково-дослідних інститутів, фармацевтичних компаній, харчової та будівельної промисловості.

Одним із найгостріших прикладних завдань, пов'язаних з процесами течій в рідинах є ідентифікація областей з інтенсивним перемішуванням. Наприклад, дана проблема є актуальною для інженерів-проектувальників пристроїв для змішування різного призначення [3].

Пошук даних областей супроводжується складнощами, адже, станом на сьогоднішній день, не розроблено загальну теорію і математичний апарат, що дозволяв би повністю описувати фізику процесу перемішування в течіях рідин у нетривіальних випадках і дозволяв би робити будь-які точні прогнози стану даної системи за заданих початкових умов через певний проміжок часу [4]. Наприклад, на сьогодні достеменно відомо, що за деякої початкової конфігурації у ламінарних течіях відбувається інтенсивне перемішування рідин [4]. Отже, постає задача пошуку даних початкових умов і областей, де відбуваються дані процеси.

Явище змішування у рідких середовищах є комплексним фізичним процесом, що, окрім процесу розтягу течії в часовій проекції, також включає процеси дифузії, поверхневого натягу рідин, тощо. Доведено, що вплив сторонніх процесів можна опустити при достатньому часі виконання перемішування [5]. Отже, завдання спрощується до вивчення деформацій вибраних частин рідкого середовища з плином часу. Іншими словами постає завдання вивчення траєкторій переміщень маркерів рідини обраної області у суцільному рідкому середовищі – науковим терміном, так звана, «задача про адвекцію». У разі суттєвої зміни стану рідини з течіями при невеликій зміні початкових умов, можна говорити про хаотичну адвекцію [6].

Відомо, що інтенсивним є те перемішування всередині області, де наявний хаотичний рух рідини в даній області. На сьогоднішній день не визначено універсальний критерій хаотичності руху рідини – необхідно проводити візуальний аналіз траекторій течій всередині рідини, візуальне дослідження проекцій рідких частинок на площину, обчислення певних математичних величин, інше [7]. Це зумовлює актуальність проектування нових програмних засобів для ідентифікації областей хаотичного руху рідини в обраній площині із заданими течіями.

Метою дослідження магістерської роботи є проектування програмного забезпечення, що матиме змогу відтворювати поведінку рідини в круговій площині, у якій перемішування буде спричинено системою вихорів. Також дана система повинна виводити візуальні та аналітичні критерії, аналізуючи які дослідник зможе зробити висновок щодо наявності областей з інтенсивним перемішуванням рідини та визначити їх місцезнаходження.

Магістерська дисертація складається із чотирьох розділів. У першому розділі наведено огляд літературних джерел з інформацією про динаміку хаотичних рухів, опис його математичного апарату, існуючі задачі та можливі шляхи їх вирішення. Також даний розділ наводить інформацію про динаміку вихорових структур, взаємодію декількох вихорів та основні теореми фізики вихорів.

В другому розділі проведено аналіз і обґрунтування обраних критеріїв, які будуть обчислюватися та відображатися в розробленому додатку. Спираючись на дані значення буде можливо зробити висновок, щодо присутності областей інтенсивного перемішування на площині.

В третьому розділі вказано програмні та архітектурні підходи, що були застосовані під час проектування програмного продукту. Вказана методика для кінцевого користувача.

В четвертому розділі було проведено аналіз створеного продукту в якості можливого стартап-проекту - аналіз ідеї, можливі маркетингові стратегії, тощо.

Створений програмний продукт призначений для інженерів-проектувальників систем змішування рідин різного призначення, експертів та наукових співробітників зв'язаних із вивченням явища хаотичної адвекції, студентів інженерних спеціальностей, інших зацікавлених осіб.

1. ОГЛЯД І ПРОБЛЕМАТИКА ТЕОРІЇ ХАОТИЧНОЇ ДИНАМІКИ

Поняття динамічного хаосу означає явище у теорії динамічних систем, коли спостерігається випадковість у поведінці даної системи, не дивлячись на те, хоча дана поведінка спричинена дією відомих визначених законів. Також це поняття має іншу назву – детермінований хаос [8]. Кожен із цих термінів можна використовувати для надання визначення для хаосу як наукового явища, на відміну від його поняття, що під ним розуміється на побутовому рівні.

Необхідно провести межу між поняттям, як випадкових рухів і хаотичних рухів. У випадку з першим типом руху спостерігач дійсно не може знати природу діючих на рухоме тіло фізичних сил і визначити її математичними рівняннями. Також у даному випадку можуть бути відомими певні статистичні характеристики процесів і сил, що спричинюють цей рух. Якщо мова ведеться про хаотичний рух, то в даному випадку повністю відсутні будь-які невідомі або випадкові сили чи процеси, що діють на фізичне тіло. Такі рухи, прогноз яким неможливо було надати відомими математичними методами досліджував відомий вчений А.Пуанкаре. Він стверджував: «Виникають випадки, коли незначна різниця в початковому стані динамічної системи тіл здатна спричинити вагомні зміни у кінцевому положенні тіл даної системи. Закладання незначної похибки на початку дослідження процесу веде до величезної помилки в результаті. Отже втрачається можливість передбачення положень тіл в даних системах» [9]. Анрі Пуанкаре був першим відомим вченим, що звернув увагу на проблему прогнозування стану динамічної системи, в якій був відсутній внутрішній порядок.

Також з даними викликами в фізиці динамічних систем зустрічався Ф.Мун. Він зазначав «Раніше вважалося, що у випадку, коли на задані початкові умови для системи тіл, а також задані сили, що спричинюють рух даної системи, то завдяки обчислювальної машини достатньої потужності та швидкості буде можливим розрахунок стану даної системи для любого проміжку часу» [10]. На сьогоднішній день достеменно відомо, що дана непередбачувана поведінка даних систем спричинена хаотичними явищами у динаміці, однією з ключових особливостей яких є надвисока чутливість до зміни початкових умов.

1.1. Властивості хаотичних систем

Для розгляду важливих характеристик систем динамічного хаосу необхідно розглянути приклади систем такого роду. В класичній літературі з хаотичної динаміки зазвичай розглядають приклади двох експериментів, які можна легко спостерігати в реальному житті.

На наведеному нижче рисунку 1.1 зазначено дві динамічні системи тіл, динамічна механіка яких являється хаотичною. На першому прикладі (рисунок 1.1, а) зображено динамічну систему де присутня ідеальна більярдна куля (це означає, що можливо опустити власне обертанням більярдної кулі), що зіштовхується та пружно відлітає від борту більярдного столу еліптичної форми. Оскільки в даному експерименті зіткнення являються пружними, то перед дослідником постає можливість спостерігати процес нескінченного руху більярдної кулі в області більярдного столу, яка не буде повторювати власну фізичну траєкторію [11].

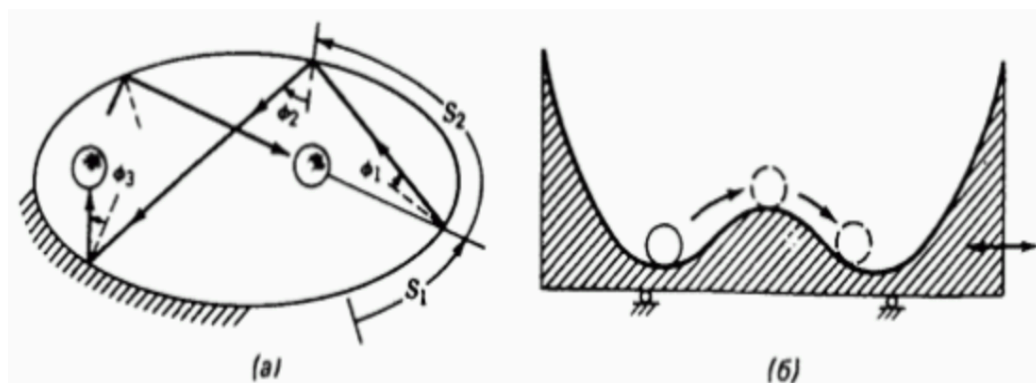


Рисунок 1.1 – Зображення хаотичних систем: а) більярд на еліптичному столі
б) переміщення кулі у системі двох потенційних порожнин

На рисунку 1.1, б зображено динамічну систему із кулею, що перебуває поміж двох, так званих, потенційних ям. В тому випадку, коли коливання столу відсутнє, куля перебуває в одному з двох можливих положень рівноваги. У випадку періодичного коливання столу з стає можливим спостереження процесу хаотичного переміщення кулі поміж потенційних ям. Отже, передбачувана дія під впливом однієї фізичної сили, з існуючим періодом її власного виникнення, на інше фізичне тіло здатна спричинювати непередбачувану відповідь із великим частотним діапазоном (рисунок 1.2) [13].

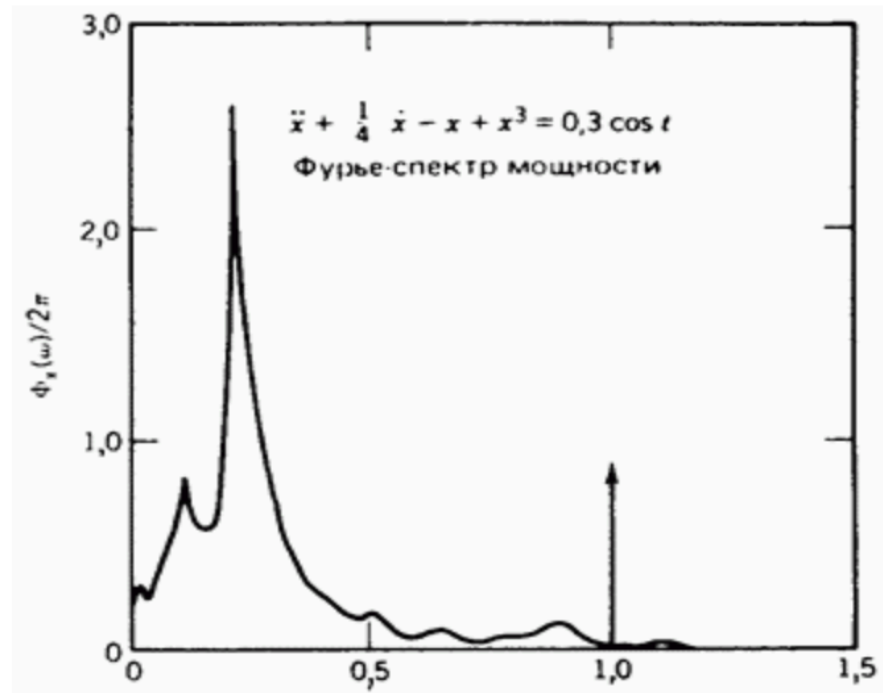


Рисунок 1.2 – Фур'є-спектр для інтенсивності переміщення у хаотичній системі двох потенційних порожнин

Наступною значущою особливістю систем із присутнім динамічним хаосом являється втрата знань щодо її початкового стану [14]. Наприклад, існує можливість визначення координат із точністю Δx , і також можливість виміряти швидкість із точністю Δv . Далі розмежуємо дану фазову площину в абстрактному просторі фазових параметрів швидкість і значення на координатній площині, на області $\Delta x \Delta v$, як видно на рисунку 1.3.

У тому разі, якщо початкові умови задачі були задані із відомим значенням початкової точності, з цього, очевидно, стає відомо, що система буде знаходитися в межах заштрихованої області на фазовій площині. У випадку хаотичності системи, ця невизначеність із часом зростає, збільшуючись до розмірів $N(t)$ областей, вказаних на рисунку 1.3, б. Збільшення невизначеності, що описується законом

$$N \approx N_0 e^{ht}, \quad (1.1)$$

являється другою характерною властивістю хаотичних систем [15]. Постійна h є пов'язаною з поняттям ентропії в теорії інформації. Дана величина пов'язана з іншою величиною – показником Ляпунова, мірою швидкості розбігання близьких траєкторій системи.

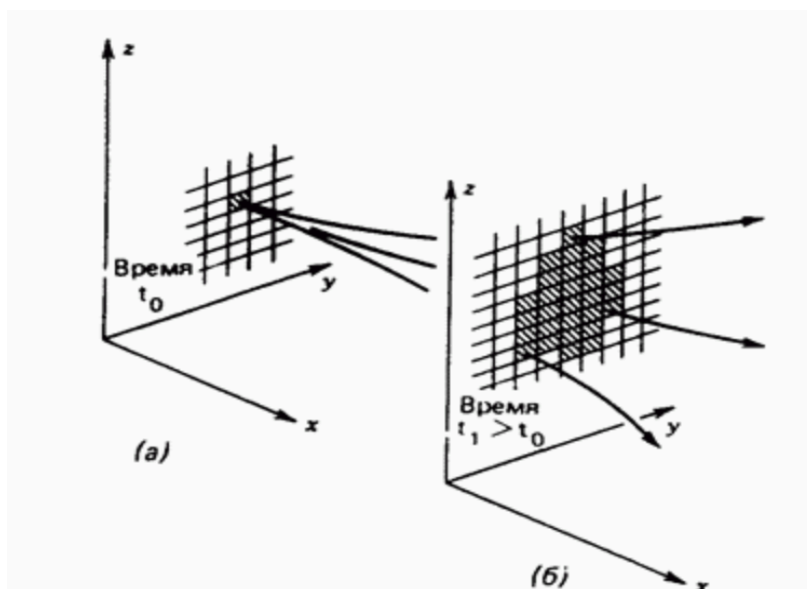


Рисунок 1.3 – Зображення розповсюдження невизначеності у системі з детермінованим хаосом

Сучасні наукові дослідження щодо динаміки хаотичних систем дають змогу зробити висновки, що хаотичний характер рухів може спостерігатися й у нелінійних визначених системах із низьким порядком. Новим відкриттям у наукових дослідженнях хаосу став той факт, що в таких системах усе ж таки присутня внутрішня впорядкованість, що дає надії на можливість передбачення окремих характеристик даних систем [16]. Перш за все, найперспективнішими є наступні напрямки: здатність прогнозувати та керувати турбулентними течіями у рідких, гідро- та хімічних динамічних системах. На даний момент турбулентність являється питанням фізики, що на поточний момент є невирішеною. А останні дослідження проблематики систем із динамічним хаосом покладають великі сподівання щодо подальшого розвитку розуміння процесу турбулентності вченим світом [17].

Постає логічне питання «У разі неможливості передбачення в хаотичних системах, хіба в них може бути присутній внутрішній порядок?». У разі дисипативних систем відповідь буде ствердною; хаотична динаміка розвивається в рамках визначеної структури [18]. Дану структуру нелегко ідентифікувати за допомогою звичайних методів вивчення динаміки, наприклад обчислюючи залежність швидкості відповіді від часу чи отримуючи частотний спектр. Цей порядок слід шукати у фазовому просторі (на вісях якого відкладені координата і швидкість). Тут ми маємо

можливість спостерігати, що хаотичні рухи мають нову геометричну властивість, звану фрактальну структуру [19].

Хаотичні коливання можуть виникати за присутності сильної нелінійності. У неперервних механічних середовищах нелінійні ефекти виникають з різних причин, зокрема:

- кінематика, наприклад, коріолісове та центробіжне прискорення
- матеріальне співвідношення, наприклад залежність напруженості від деформації
- граничні умови, наприклад, вільна поверхня рідини, або обмеження, що визначаються деформацією
- нелінійні сили, наприклад магніті або електричні
- геометричні нелінійності, пов'язані з сильною деформацією конструкцій (балки, плити перекриття, оболонки, тощо).

Хоча хаотичні явища спостерігалися в термогідродинамічних, механічних і електричних системах, через широке розповсюдження турбулентності хаос у рідинах іноді вважався фундаментальним прикладом хаосу. Але, згідно останніх досліджень нелінійно-в'язких (неньютонових) рідин або пружнопластичних середовищ, було виявлено широкий спектр нелінійних і хаотичних явищ механіки, електромагнетизму та акустики.

З наведених вище фактів можна зробити висновок, що хаотичні явища є можливими у багатьох фізичних системах. У науковій і технічній літературі щомісяця повідомляється про відкриття нових подібних явищ. Неповний перелік механічних і електричних систем, у яких спостерігаються хаотичні коливання, включають:

- коливання зігнутих пружних структур
- аеропружні системи
- динаміка структур колесо-колія
- магнітомеханічні приводи
- системи з тертями ковзання
- системи з обертанням і гіроскопами
- нелінійні акустичні системи

- прості ланцюги с джерелами струму та діодами
- ланцюги з гармонічними джерелами струму і р-п транзисторами.

Власне питанням хаотичної динаміки не приділялась така пильна увага, якби не наступний приклад із механіки рідин. У 1963 році спеціаліст з фізики атмосфери Е.Н. Лоренц із Массачусетського технологічного інституту запропонував просту модель теплової конвекції. Рідина, будучи підігрітою знизу, стає легшою і випливає, а більш важка рідина опускається під дією гравітації. Такі рухи часто організуються у конвективні валики, подібні рухам рідини в тривимірному торі, зображеному на рисунку 1.4 [20].

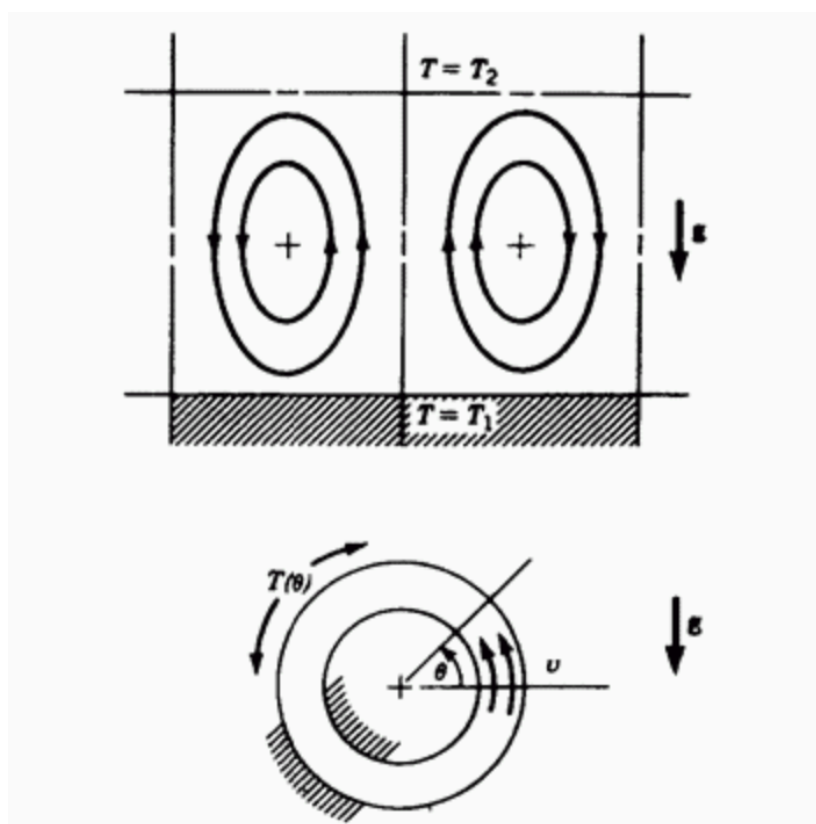


Рисунок 1.4 – Вгорі зображена схема ліній потоку рідини у конвективній комірці при стаціонарному русі, знизу – одновимірна конвекція в кільцевій трубці під дією сили тяжіння та градієнта температури

Запропонована вище модель спричинила високу зацікавленість і дослідники почали активно вивчати процеси хаотичних рухів у рідинах. Подальше вивчення хаотичної динаміки відкрило велику кількість невирішених прикладних інженерних задач, вирішення яких є актуальним і досі. Особливу увагу приділяються проблемам явища турбулентності та виникненню хаотичної поведінки системи в ламінарних течіях рідини.

1.2. Хаотична динаміка у рідких середовищах

Явище змішування у рідких середовищах є комплексним фізичним процесом, що, окрім процесу розтягу течії в часовій проекції, також включає процеси дифузії, поверхневого натягу рідин, тощо. Доведено, що вплив сторонніх процесів можна опустити при достатньому часі виконання перемішування. Отже, завдання спрощується до вивчення деформацій вибраних частин рідкого середовища з плином часу. Іншими словами постає завдання вивчення траєкторій переміщень маркерів рідини обраної області у суцільному рідкому середовищі – науковим терміном, так звана, «задача про адвекцію» [21]. У разі суттєвої зміни стану рідини з течіями при невеликій зміні початкових умов, можна говорити про виникнення стану хаотичної адвекції.

Дослідники зустрічаються з великими труднощами при аналізі перемішування рідини під час перемішування турбулентними течіями (рисунок 1.5).

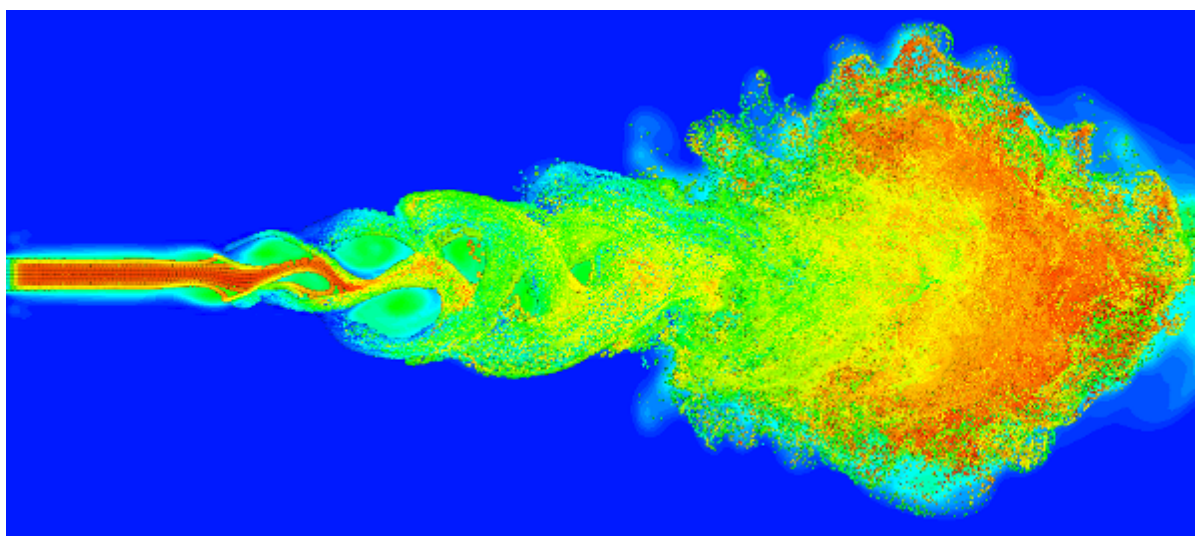


Рисунок 1.5 – Турбулентна течія

Останні результати наукових експериментів вказують на те, що довжина виділеного контуру рідини буде зростати з часом із експоненціальним порядком. Також, в останні роки був відкритий той факт, що і ламінарні течії (рисунок 1.6) здатні володіти також хаотичними характеристиками.

В свою чергу, цей даний рух може спричинюватися не усіма течіями і спостерігати його можна у частині своєї області. Це зумовлено є хаотичним характером траєкторій переміщень окремих маркерів рідини усередині заданої ламінарної течії рідини.

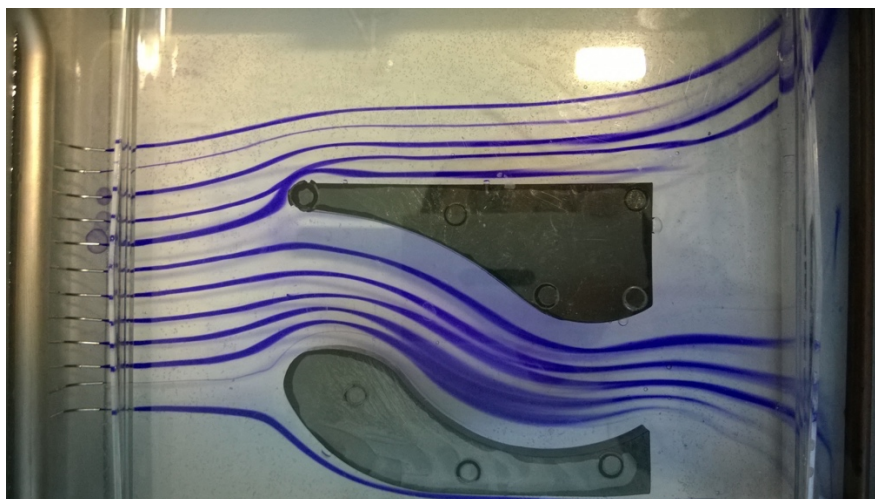


Рисунок 1.6 – Ламінарна течія

Нижче можна ознайомитися із формулою основного диференційного рівняння для адвекції:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + u \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0, \quad \psi(x, t) = \psi(x - ut) \quad (1.2)$$

З нього слідує, що швидкість частинок у динамічній рідкій системі за наявності течії в ній має значення швидкості власне потоку в координатах цієї точки. З цього слідує, що усі частинки рідини зазнає впливу адвекції кожна окремо. В разі хаотичного руху даної частинки відрізок, який утворений подібними частинками буде зазнавати розтягу за експоненціальним законом. У гідродинаміці цей стан називається інтенсивний режим перемішування.

Тобто, можливо зробити висновок, що головним критерієм хаотичності характеру процесу перемішування є розтяг визначеного контуру рідини в експоненціальному порядку [22]. Далі, для визначення місцезнаходження інтенсивних перемішувань у суцільних рідких середовищах, виникає потреба в аналізі критеріїв для визначення хаотичного характеру переміщень для елементарних частинок рідини.

Дослідження процесу перемішування рідини буде неповним без аналізу видозмін у різних зонах суцільного рідкого середовища, що утворене атомарними рідкими частинками. На основі цього використовуються наступні критерії: спостереження за фазовими траєкторіями маркерів рідини і вихорів, перетини Пуанкаре, визначення показника Ляпунова з максимальним значенням, тощо [23].

У випадку, коли фазові траєкторії рідких частинок утворюють регулярні криві, то рух рідини у даних течіях буде регулярним, тобто інтенсивне перемішування не спостерігається [24]. Якщо фазові траєкторії будуть формувати хаотичні малюнки, що заповнюють область фазової площини, то в даній течії буде наявний інтенсивний режим перемішування рідини.

У випадку, коли перетин Пуанкаре рідкої частинки утворює множину точок, що лягає на регулярну криву, або її частину, то рух рідини у даній області буде регулярним, тобто інтенсивне перемішування не спостерігається [24]. Якщо перетин Пуанкаре рідкої частинки утворює множину точок, що заповнюють область фазової площини, то в даній течії буде наявний інтенсивний режим перемішування рідини.

У разі, коли після обчислення показника Ляпунова для обраної фазової траєкторії було зроблено висновок про її нестійкість, то й інша траєкторія, яка на початку дослідження знаходилась максимально близько, буде віддалятися від неї з експоненціальною швидкістю [25].

Хаотичне перемішування спричинює значні злами і видовження контуру, який на початок руху в рідині був гладким. Це спричинює труднощі при зображенні даного контуру, побудові його проєкцій і обчисленні його довжини. Не рідкістю є випадки, коли одна множина рідких частинок буде знаходитися близько один до одного, а інша частина буде розташована хаотично по всій області перебігу процесу перемішування в даній рідинній системі.

У наукових джерелах, темою яких є пошук і вивчення критеріїв і підходів визначення хаотичності динаміки у рідких системах, зазначається, що для пошуку зон із присутнім інтенсивним режимом перемішування рідини застосовуються критерії хаотичності переміщення конкретних вибраних маркерів рідини. Але в той же час варто зазначити, що області суцільного рідкого середовища утворені з незчисленної множини таких маркерів, певні з них виконують хаотичні рухи, в той час як деякі будуть рухатися нехаотично.

Щоби аналітично відшукати області інтенсивного перемішування необхідно виконувати аналіз деформації контуру для вибраної області суцільного рідкого середовища, що за інтенсивного режиму перемішування буде зазнавати розтягнення в експоненціальному порядку а також формуванню стиків, зламів, складчастих

структур. Деформація даних границь областей рідких систем на сьогоднішній день може бути цілком проаналізована та спрогнозована наявними способами інтерполяції ліній.

Для прикладу можна розглянути відомий експеримент, що яскраво зображує особливості хаотичної динаміки в рідинах. У прямокутній ємності залита в'язка рідина, наприклад гліцерин, також борти даної ємності здатні рухатися. Далі відбуваються періодичні коливання – один півперіод відбувається рух без прискорення дальньої стінки зліва направо, інший півперіод відбувається рух передньої стінки в протилежному напрямку з такою ж швидкістю. За такого, на перший погляд, простого і регулярного руху течії відбуватиметься процес інтенсивного перемішування рідини, що спричинений процесом хаотичної адвекції, результати якого можна спостерігати на рисунку 1.7 [26].

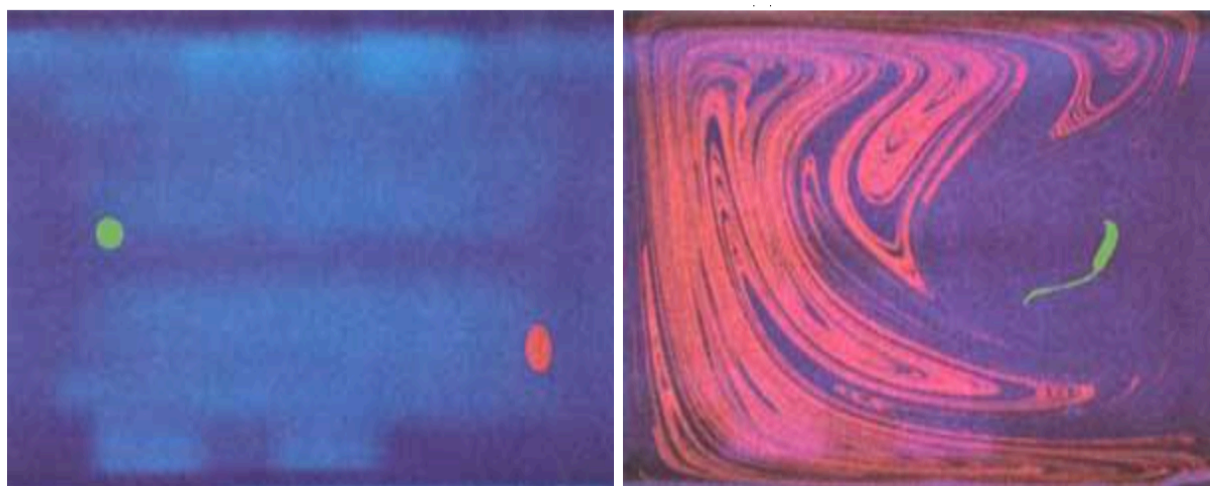


Рисунок 1.7 – Демонстрація витягування та формування складок при хаотичному перемішуванні

На даному рисунку зліва зображено стан в'язкої рідини з двома областями в протилежних сторонах ємності, в які було введено фарбу, що був на початку експерименту. Справа зображено результат після виконання десяти повних періодів коливання. Пляма зліва майже не змінилася, у той час як пляма справа зайняла майже всю область ємності. Тож навіть візуально можна зробити висновок, що в даній рідкій системі присутній як і регулярний рух (у випадку з рідиною пофарбованою в білий) так і хаотичний рух (у випадку з рідиною пофарбованою в чорний).

При можливості, явища в нелінійній динаміці зручно відображувати в якості малюнків або за допомогою інших геометричних підходів. Зокрема, наочно можна

зобразити незатухаючий осцилятор $\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$ на площині фазових параметрів (x, \dot{x}) , рух якого представлено еліпсом (рисунок 1.8).

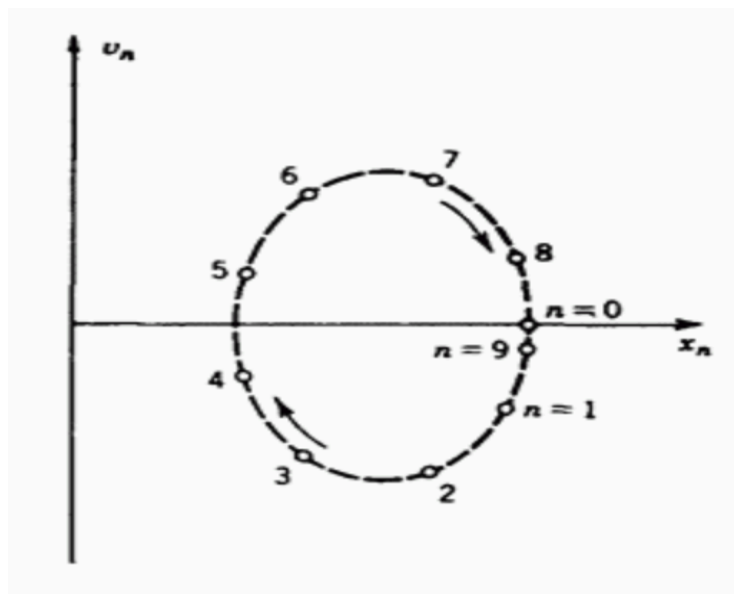


Рисунок 1.8 – Фазова траекторія незатухаючого осцилятора на фазовій площині (x, \dot{x})

Тут зображений часовий вимір у неявному форматі, плин часу зображається як циклічний переміщення уздовж координат еліпсу у напрямку стрілки годинника. Ширина і довжина еліпсу будуть визначатися значеннями початкових умов для пари фазових координат (x, \dot{x}) .

Загальною практикою є те, що під час аналізу нелінійних явищ на початковому етапі необхідно відшукати точки рівноваги досліджуваної системи і лише потім аналізувати переміщення уздовж кожної з цих точок. Отже, за умов, що досліджувану динамічну систему можливо представити як систему диференціальних рівнянь першого порядку

$$\dot{x} = f(x), \quad (1.3)$$

де x – це математичний вектор, координати якого є параметрами стану даної системи, то можна зробити висновок, що точки рівноваги можна знайти розв'язавши рівняння $x = 0$, або

$$f(x_e) = 0. \quad (1.4)$$

Зокрема, гармонічний осцилятор матиме лише одну таку точку, що буде знаходитись на початку координат: $x = (x, v \equiv \dot{x})$, $x_e = 0$, $v_e = 0$. Щоби провести аналіз руху системи в околі координати $x = x_e$ необхідно представити функцію $f(x)$

у вигляді ряду Тейлору в околі точок рівноваги x_e та проаналізувати отримані лінійні математичні задачі.

Для демонстрації даного способу розв'язку наведемо приклад із системою з двома рівняннями першого порядку:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y), \\ \dot{y} = g(x, y). \end{cases} \quad (1.5)$$

У випадку, коли час не є явно представленим у функціях g і f , то дану задачу можна називати автономною. Початкові умови для точок рівноваги такі, що вони слідуєть умовам: $f(x_e, y_e) = 0$ і $g(x_e, y_e) = 0$. Далі необхідно ввести контрольні відхилення від існуючих точок рівноваги, як можна спостерігати у наступному математичному рівнянні 1.6,

$$x = x_e + \eta \text{ і } y = y_e + \xi \quad (1.6)$$

далі представимо 1.5 наступним чином:

$$\frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \eta \\ \xi \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} & \frac{\partial f}{\partial y} \\ \frac{\partial g}{\partial x} & \frac{\partial g}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \eta \\ \xi \end{Bmatrix}, \quad (1.7)$$

де отримані диференціали, згідно заданих початкових умов, матимуть точний розв'язок в точці (x_e, y_e) .

Деякі автори вводять позначення для матриці з рівняння 1.7 позначеннями ∇F або DF , де $F = (f, g)$. Тип руху в околі точок рівноваги обчислюється за допомогою власних рішень для 1.7

$$\begin{Bmatrix} \eta \\ \xi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} e^{st} \quad (1.8)$$

де α і β – константи. Тип переміщення буде визначатися базуючись на характеристиках власних значень для DF (базуючись на тому, чи є значення s дійсним або комплексним, а також у залежності від знаку $Re(s)$).

На рисунку 1.9 зображені фазові траєкторії руху в динамічних системах при різноманітних значеннях власних значень s . Зокрема, сідлоподібна траєкторія буде спостерігатися у тому випадку, коли обоє s являються дійсними, при тому що $s_1 < 0$ а $s_2 > 0$. Спіралевидна траєкторія виникає у тому разі, коли обоє власних значення є комплексно-спряженими.

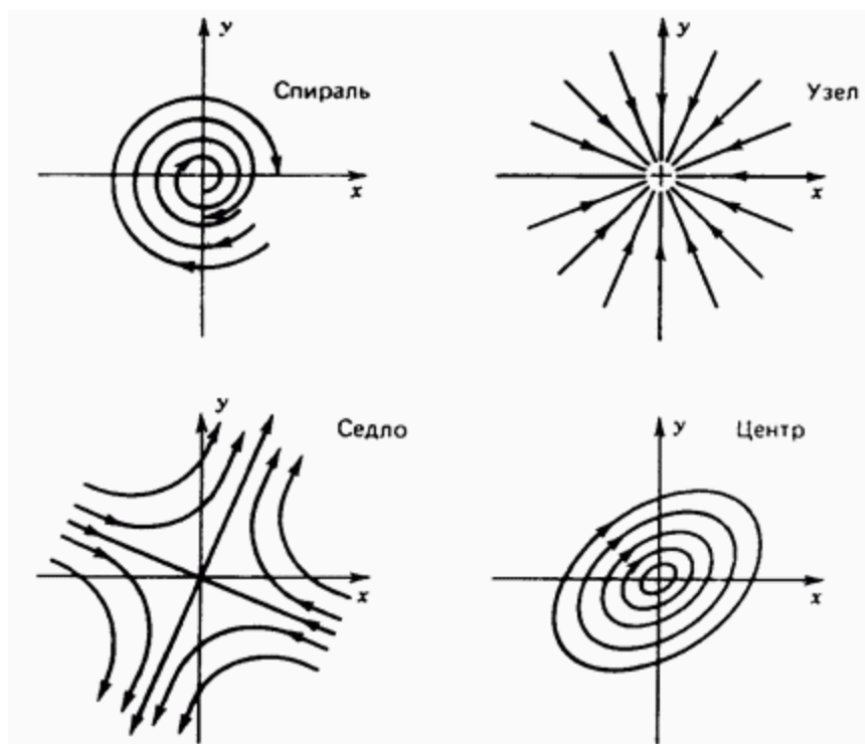


Рисунок 1.9 – Зображення фазових траєкторій околів чотирьох неоднакових класів точок рівноваги заданої системи з двома диференціальними рівнянь, де не спостерігається явна залежність від часу.

Стійкість розв'язку 1.8 залежить від знаку $Re(s)$. В тому випадку, якщо дійсна частина любого з власних розв'язків s_1 або s_2 є додатною, то рух системи в околі даних точок буде вважатися за нестійкий. На сьогодні розроблені теорії, що доводять той факт, що у тому разі коли розв'язки рівняння не являються повністю уявними, то і рух, що відбувається у даній динамічній системі буде подібний до руху у 1.7. Рух, де присутнє коливання ($s = \pm i\omega$) потребує подальшого аналізу для досягнення необхідного висновку, чи є дана система стійкою. Дані принципи діють також і для систем більшої розмірності, тощо.

З даного стислого огляду можна зробити висновки, що існує три класичні види динамічного руху: рівновага, періодичний рух (інакше граничний цикл), квазіперіодичний рух.

Ці стани маю назву атрактори, оскільки в присутності будь-якого затухання перехідні відхилення подавляються й системи починає тяжіти до одного з трьох вищезазначених станів [27].

У той же час існує зовсім інший клас руху, що є характерними для нелінійних коливань, що не зводяться до жодного з даних трьох атракторів. Даний клас рухів

являється хаотичним у тому сенсі, що вони є непередбачуваними у разі присутніх навіть малої невизначеності початкових умов. Даний клас руху часто пов'язаний зі станом, що називається дивним атрактором.

Класичним атракторам відповідають класичні геометричні об'єкти у фазовому просторі: стану рівноваги відповідає точка, періодичному руху або граничному циклу відповідає замкнена крива, квазіперіодичному руху відповідає поверхня в тривимірному фазовому просторі. Дивному атрактору відповідає новий (по відношенню до класичної геометрії) геометричний об'єкт, що називається фрактальною множиною. У тривимірному фазовому просторі фрактальна множина дивного атрактора виглядає як набір нескінченного числа прошарків, або паралельних площин, причому у деяких із них відстань один від одного наближається до нескінченно малого. Для опису цього нового атрактора динаміки необхідні нові математичні ідеї та мова, а для його ідентифікації та якісної характеристики – нові методи експериментів. Дослідження в даному напрямку почалися лише у останні десятиліття.

Аж до останнього десятиліття XX століття в динаміці переважає представлення, що порядок виникає з навколишнього безформного хаосу, і цей порядок дізнається лише за передбачуваної періодичної структури. Тепер дану точку зору витісняє інша концепція хаотичних явищ. Вони виникають згідно регулярних законів і за ними стоїть не безформний хаос, але хаос з прихованим порядком, фрактальними структурами. Зокрема, хаос може асоціюватися зі структурами, вкладеними один в одного, вихорами, вкладеними в інші вихорові структури, як це може відбуватися, наприклад, в процесах перемішування рідин [28].

1.3. Властивості вихрових структур

Вихровими рухами називаються такі рухи, складовою частиною яких є обертальний рух частинок досліджуваного середовища (рідкого або газоподібного). Регулярно у природі виникають такі випадки рухів, коли обертання частинок локалізуються в певну структуру і, таким чином, стає можливим спостереження процесу утворення більше або менше ізольованих областей досліджуваного середовища, що вміщують обертальний рух (рисунок 1.10)



Рисунок 1.10 – Зображення вихору посеред моря

Дані області середовища зазвичай називаються вихорами. Вихрові рухи нерідко можна спостерігати в природних процесах у вигляді потужних вихороутворень, такі явища називаються смерчами, тайфунами, тощо.

Вихори в свою чергу здатні складатися з кільцевих структур, що можна спостерігати під час процесу вихлопу двигунів внутрішнього згоряння. Більш-менш інтенсивне вихроутворення буде відбуватися позаду будь-якого тіла, що виконує рух у деякому суцільному середовищі.

Для подальшого розгляду явищ, пов'язаних із вихровими структурами, виникає потреба зробити точне визначення спеціальним фізичним поняттям. Вихровою швидкістю називається миттєва кутова швидкість нескінченно малої (атомарної) рідкої частинки. Вихрова області – певна зайнята середовищем область, у кожній точці якої присутня вихрова швидкість. Вихровим рухом називається рух середовища в обраній вихровій області [29].

Напругою вихору, або ж його інтенсивністю називається значення подвоєного добутку величини вищеписаної вихрової швидкості на площу поперечного перерізу даного вихора

$$\Gamma = \int_S^0 \vec{\omega} \cdot d\vec{S} . \quad (1.9)$$

Вихори являються головним компонентом турбулентних течій. Розподіл швидкостей, завихреності (математичний ротор швидкості течії) так як і концепція

циркуляції використовуються для описання вихрових структур. У більшості вихорів швидкість потоку рідини є найбільшою біля своєї осі і зменшується в зворотному відношенні до відстані від цієї осі.

За умов відсутності впливу сторонніх сил, в'язке тертя у рідини має тенденцію до організації потоку у сукупність ірротаційних вихорів, можливо, накладаючись на більші потоки потоків, в тому числі і більш масштабні вихори. Після утворення вихори мають здатність рухатися, розтягуватися, обертатися та взаємодіяти іншим складним чином. Руховий вихор вміщує в собі певний кутовий і лінійний імпульс, енергію а також масу.

Теоретично, швидкість рідких частинок u а також завихреність у вихорі здатна змінюватися різним чином залежно від відстані r до осі вихору. Однак існує два важливих специфічних випадки.

В першому випадку, в тому разі коли рідина обертається як тверде тіло – тобто, якщо кутова швидкість обертання Ω є рівномірною, так що u буде зростати прямо пропорційно відстані r від осі – рідка частинка, що переноситься потоком також буде обертатися навколо власної осі таким чином, ніби вона є частиною загального жорсткого тіла (рисунок 1. 11). У такому описаному потоці значення завихреності скрізь буде однаковою: його напрямок є паралельним осі обертання, а його величина буде дорівнювати подвійній рівномірній кутовій швидкості Ω рідини навколо центру обертання.

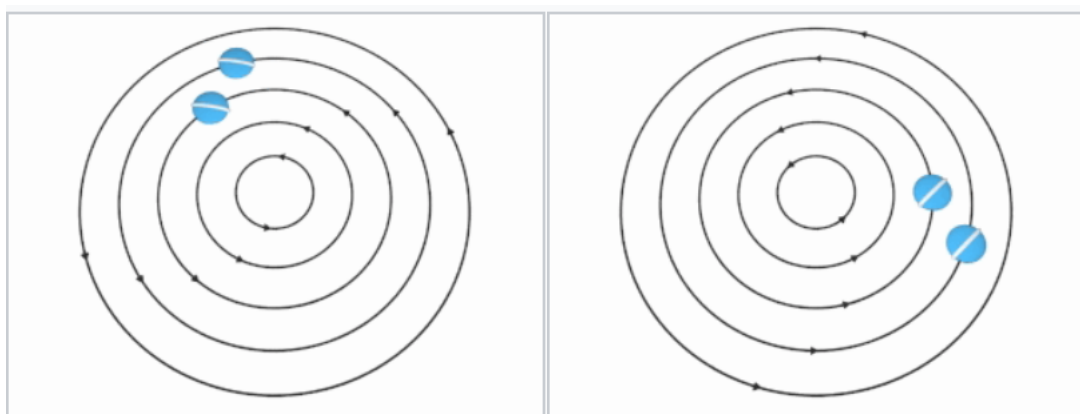


Рисунок 1.11 – Зображення жорсткого вихору

В другому випадку, якщо швидкість рідкої частинки u буде обернено пропорційною відстані r від осі, тоді уявна частинка не буде виконувати обертання навколо власної осі. Дана частинка буде дотримуватися такої ж орієнтації під час

обертання по колу навколо вихрової осі (рисунок 1.12). В даному випадку вихор $\vec{\omega}$ буде дорівнювати нулю у будь-якій точці, що знаходиться не на цій осі, а даний тип вихору отримав назву іротаційного.



Рисунок 1.12 – Зображення іротаційного вихору

Обертальний вихор – той вихор, що має ненульову завихреність від центра вихору – здатен зберігатися в такому стані протягом невизначеного часу лише за рахунок застосування додаткової сили, тобто він не генерується самим рухом обраної рідини [30].

Наприклад, якщо ємність із водою піддавати обертальному руху з постійною кутовою швидкістю навколо своєї вертикальної осі, вода також почне обертальний рух у даній ємності. Рідкі частинки будуть рухатися по колам зі швидкістю, що становить добуток відстані від центру вихору до кутової швидкості обертання ємності. У даному випадку вільна поверхня води буде мати параболічну форму.

У стаціонарному вихорі типова струмись (лінія, що є дотичною до вектору швидкості потоку) – це замкнутий цикл, який оточує вісь. Кожна лінія вихорів (лінія, що є дотичною до вектору завихреності) є приблизно паралельними осі. Поверхня, що є всюди дотичною до швидкості потоку та завихреності, називається вихровою трубкою. Загалом, вихрові трубки можуть бути вкладеними одна в одну навколо осі обертання. Сама вісь являється однією з вихрових ліній, граничним випадком вихрової трубки з нульовим діаметром.

Згідно з існуючими теоретичними відомостями, вихрові лінії не можуть починатися або закінчуватися рідиною – крім миттєвості, в нестабільному потоці, поки вихор утворюється чи розсіюється. Загалом, вихрові лінії, наприклад лінія осі, є або замкнутими циклами, або закінчуються на межі рідини. Прикладом останнього

являється вихор, а саме вихор у певній водоймі, вісь якої закінчується на вільній поверхні.

Вихор, який утворився нещодавно негайно починає розтягатися і згинатися, щоб уникнути будь-яких вихрових ліній із відкритим кінцем. Наприклад, коли запускається двигун літака, вихор зазвичай утворює попереду кожного гвинта літака. Один кінець вихрової лінії буде прикріпленим до двигуна, а інший кінець, як правило, розтягується і згинається до досягнення земної поверхні [31].

Коли вихори намагаються зробити видимими за допомогою димових або чорнильних крапель, можна спостерігати спіральні контури або потоки. Проте такий зовнішній вигляд є ілюзією, а рідкі частинки рухаються замкненими шляхами. Спіральні смуги, що приймаються як оптичні, є насправді хмарами маркерної рідини, яка на початку трансформувалася у деяку кількість вихрових трубок і розтягнулася у вигляді спіралі за неоднорідного розподілу швидкості потоку.

Рух рідини у вихорі створює динамічний тиск (окрім будь-якого гідростатичного тиску), який має найменше значення у зоні серцевини (в районі осі обертання), і збільшується в міру віддалення від неї, відповідно до принципу Бернуллі.

У жорсткому вихровому потоці рідини з постійною щільністю динамічний тиск є пропорційним квадрату відстані r від осі. У постійному гравітаційному полі вільна поверхня рідини, якщо вона є, являється увігнутим параболоїдом.

При іротаційному вихровому потоці з постійною щільністю рідини і циліндричною симетрією, динамічний тиск буде коливатися у межах $P_\infty - \frac{K}{r^2}$, де значення P_∞ є граничним тиском, нескінченно віддаленим від осі. Дана формула забезпечує ще одне обмеження, оскільки тиск не може бути негативним. Вільна поверхня (у разі її присутності) різко падає біля лінії осі, глибина якої буде обернено пропорційна r^2 . Форма, утворена вільною поверхнею, називається гіперболоїдом або «роги Гавриїла» [32].

Вихори не повинні бути стаціонарними функціями – вони можуть рухатися та змінювати форму. Вихровий потік також здатен поєднуватися з радіальними або осьовими малюнками потоку. У даному випадку вихровими лініями є не замкнені криві, а спіралі. Це стосується торнадо і дренажних вихорів (рисунок 1.13).



Рисунок 1.13 – Зображення дренажного вихору

Вихор зі спіральними лініями називається соленоїдальним.

Вихори містять значну енергію у круговому русі рідини. У ідеальній рідині ця енергія ніколи не може бути розсіюваною і вихор буде зберігатися назавжди. Проте, реальні рідини демонструються в'язкість, що дуже швидко розсіює енергію з серцевини вихорів. Лише через даний факт вихрова лінія може закінчуватися в рідині, а не на її межі.

1.4. Особливості взаємодії всередині систем декількох вихорів

Для опису положень тіл при рухах у системах із суцільним рідким середовищем використовують наступні формули: рівняння Нав'є-Стокса (рівняння 1.10) та рівняння нерозривності (рівняння 1.11).

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla)U = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \vartheta \Delta U \quad (1.10)$$

$$\nabla \cdot U = 0, \quad (1.11)$$

де $U(r, t)$ – поле швидкості потоку рідкого середовища, $p(r, t)$ – поле тиску, ρ – густина, ϑ – коефіцієнт в'язкості, ∇ – оператор Набла, Δ – оператор Лапласа [33].

Якщо застосувати до 1.10 математичну операцію ротора та прийняти до відома попереднє рівняння 1.11, то можна вивести формулу переміщення вихорів у суцільному рідкому середовищі

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (U \cdot \nabla) \omega - (\omega \cdot \nabla) U = \vartheta \Delta U \quad (1.12)$$

З даної формули слідує той факт, що значення та місцезнаходження дії тиску не здатне змінювати динаміку вихорів.

За випадку двовірної нев'язкості ($\vartheta = 0$) формулу 1.12 можна значно спростити. Якщо прийняти до відома рівняння 1.11, можна отримати рівняння для завихреності за Гельмгольцем [34]:

$$\frac{D\omega}{Dt} = \frac{\partial \omega}{\partial t} + U \frac{\partial \omega}{\partial x} + V \frac{\partial \omega}{\partial y} = 0, \omega = \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial U}{\partial y}. \quad (1.13)$$

Отримане рівняння може містити досить багато аналітичних розв'язків, які залежать від початкових умов: розташування всередині поля завихрення та інші граничні умови.

У подальшому опишемо функцію току $U = \text{rot} \Psi$, в якій у разі використання в системі с двома вимірами присутня лише одна компонента. Функція току створює зв'язок поля швидкості області заданої динамічної системи за допомогою наступних рівнянь:

$$U = \frac{\partial \Psi}{\partial y}, V = \frac{\partial \Psi}{\partial x}, \quad (1.14)$$

де $U(x, y)$ і $V(x, y)$ це проекції для поля швидкості.

За даних умов рівняння нерозривності буде достовірним. Також, в такому випадку, скалярна функція току $\Psi(x, y)$ й єдина складова частина поля завихреності $\omega_z = \omega(x, y)$ являються зв'язаними один із одним за допомогою рівняння Пуасона (рівняння 1.14)

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} = -\omega. \quad (1.15)$$

У тому разі, коли потік суцільного рідкого середовища буде відбуватися між певних твердих бар'єрів, то для цих бар'єрів мають задовольнятися граничні умови. У випадку з в'язкою рідиною граничними умовами являються відсутні швидкості течії на границях.

$$U|_s = 0 \text{ або } \Psi|_s = \text{const}, \quad \left. \frac{\partial \Psi}{\partial n} \right|_s = 0 \quad (1.16)$$

Математично, рух для суцільних середовищ може бути описаний як фізична сума двох рухів. По-перше, правдивим є твердження про те, що рух обраної області області можна визначити як рух єдиного тіла, іншими словами – квазітвердий рух. По-друге, у суцільних середовищах завжди спостерігається рух деформації цієї області, іншими словами – деформаційний рух. Під першою теоремою Гельмгольца і розуміють даний висновок, який було отримано після його доведення вченим [35].

Для будь-якої точки M в полі швидкості суцільного середовища існує два наступні вектори: швидкість $\vec{U}(x, y, z, t)$ і кутова швидкість $\vec{\omega}(x, y, z, t)$. Для даних векторів можна співвіднести наступні класи кривих: вектору швидкості – лінії течії, вектору $\vec{\omega} = \text{rot} \vec{U}$ – вихрові лінії, мається на увазі лінії, точки яких дотично збіжні у напрямку швидкісного вектору $\vec{\omega}$.

Згідно другої теореми Гельмгольца: «За системи, у якій присутня ідеальна нестисна рідина, значення жорсткості для вихрової трубки є статичною для любого перерізу увесь час» [35]. Дана теорема дозволяє зробити висновок про неможливість закінчення вихрової трубки всередині середовища. У природі можливим є спостереження або замкнених вихрових кілець, або вихрових трубок, які починаються та закінчуються на границях розмежування поверхонь із різними агрегатними станами. Зокрема вихор, що утворюється при стоку води в умивальнику: одна його сторона закінчується на границі розмежування води і повітря, інша на границі розмежування води і стінку водостоку.

Також важливими для вихрової динаміки є положення з наступної теореми Томпсона: «У тому разі, коли сили, під дією яких відбувається рух у баротропному середовищі, мають потенціал, то інтенсивність для трубки вихору буде незмінною протягом всього часу руху» [36]. З цього слідує, що у випадку ідеальної рідини, вихорові структури не виникають. Цей, на перший погляд, неоднозначний висновок пояснюється припущенням, яке зазвичай вводиться у вихрових динамічних системах. В реальності, вихори в рідинах зазнають згасання. Даний факт спричинений наявністю в'язкості в рідинах, витратами енергії вихорів на тертя. Факт неможливості

створення вихорів у ідеальних середовищах легко пояснити відсутністю в'язкості в даних середовищах, що в природі породжує вихрові структури.

Нехай в ідеальній рідині розташовано N паралельних прямолінійних вихрових ниток зі значеннями інтенсивності Γ_α . Дані вихрові нитки перетинають площину (x, y) в координатах (x_α, y_α) , де $\alpha = 1, \dots, N$. Згідно з теорією Гельмгольца, нитка вихору виконує переміщення разом із усіма неділимыми частинками, що її утворюють [35]. Отже, у разі відсутності зовнішніх течій рівняння для опису руху N точкових вихорів на рідині будуть наступні:

$$\begin{aligned} \frac{dx_\alpha}{dt} &= -\frac{1}{2\pi} \sum_{\beta=1, \beta \neq \alpha}^N \frac{\Gamma_\beta (y_\alpha - y_\beta)}{(x_\alpha - x_\beta)^2 + (y_\alpha - y_\beta)^2} \\ \frac{dy_\alpha}{dt} &= -\frac{1}{2\pi} \sum_{\beta=1, \beta \neq \alpha}^N \frac{\Gamma_\beta (x_\alpha - x_\beta)}{(x_\alpha - x_\beta)^2 + (y_\alpha - y_\beta)^2}. \end{aligned} \quad (1.17)$$

Рух точкового вихору буде спричинений векторною сумою швидкостей інших $N - 1$ вихорів. Для отримання однозначного розв'язку поставленої системи диференціальних рівнянь потрібно знати наступні початкові умови: координати місцезнаходжень N вихорів в момент часу $x_\alpha(0) = x_\alpha^0, y_\alpha(0) = y_\alpha^0$.

В системі рівнянь 1.17 присутні чотири незалежних перших інтеграла (ще відомі як інваріанти)

$$\begin{aligned} H &= \frac{1}{2\pi} \sum_{\alpha=1}^N \sum_{\beta=1, \beta \neq \alpha}^N \Gamma_\alpha \Gamma_\beta \ln \left[(x_\alpha - x_\beta)^2 + (y_\alpha - y_\beta)^2 \right] = \text{const}, \\ Q &= \sum_{\alpha=1}^N \Gamma_\alpha x_\alpha = \text{const}, P = \sum_{\alpha=1}^N \Gamma_\alpha y_\alpha = \text{const}, I = \sum_{\alpha=1}^N \Gamma_\alpha (x_\alpha^2 + y_\alpha^2) = \text{const} \end{aligned} \quad (1.18)$$

які виражають закони збереження енергії, збереження імпульсу рідини уздовж осей O_x, O_y і моменту імпульсу, відповідно.

Нехай в ідеальній рідині розташовано N точкових вихорів зі значеннями інтенсивностей $\Gamma_\alpha (\alpha = 1, \dots, N)$, які розташовані в точках з координатами (x_α, y_α) над нескінченною площиною $y = 0$. Граничною умовою непротікання рідини на твердій поверхні повинна виконуватися. Для цього скористаємося методами зображень. В вищеписану систему вихорів додається нова система уявних точкових вихорів, параметри яких пов'язані з параметрами дійсних вихорів наступним чином

$$\Gamma_{\alpha}^* = -\Gamma_{\alpha}, \quad x_{\alpha}^* = x_{\alpha}, \quad y_{\alpha}^* = -y_{\alpha}. \quad (1.19)$$

Тоді система рівнянь, що описує рух системи N точкових вихорів над нескінченною площиною, матиме наступний вигляд

$$\begin{aligned} \frac{dx_{\alpha}}{dt} &= -\frac{1}{2\pi} \left\{ \sum_{\beta=1, \beta \neq \alpha}^N \frac{\Gamma_{\beta}(y_{\alpha} - y_{\beta})}{(x_{\alpha} - x_{\beta})^2 + (y_{\alpha} - y_{\beta})^2} - \sum_{\beta=1}^N \frac{\Gamma_{\beta}(y_{\alpha} + y_{\beta})}{(x_{\alpha} - x_{\beta})^2 + (y_{\alpha} + y_{\beta})^2} \right\} \\ \frac{dy_{\alpha}}{dt} &= -\frac{1}{2\pi} \left\{ \sum_{\beta=1, \beta \neq \alpha}^N \frac{\Gamma_{\beta}(x_{\alpha} - x_{\beta})}{(x_{\alpha} - x_{\beta})^2 + (y_{\alpha} - y_{\beta})^2} - \sum_{\beta=1}^N \frac{\Gamma_{\beta}(x_{\alpha} - x_{\beta})}{(x_{\alpha} - x_{\beta})^2 + (y_{\alpha} + y_{\beta})^2} \right\}. \end{aligned} \quad (1.20)$$

Система рівнянь 1.20 має тільки два інваріанти руху, що визначають закони збереження енергії та імпульсу рідини уздовж осі O_x .

Нехай всередині кругової порожнини радіуса R знаходиться система із N точкових вихорів зі значеннями інтенсивності $\Gamma_{\alpha} (\alpha = 1, \dots, N)$, розташованих в точках з координатами (x_{α}, y_{α}) на координатній площині, координатна система якої зв'язана із її геометричним центром.

Систему рівнянь, що описують рух даної системи вихорів виведено на базі методу зображень, суть якого полягає у введенні системи нових уявних вихорів. Параметри уявних вихорів пов'язані з параметрами дійсних вихорів наступним чином

$$\Gamma_{\alpha}^* = -\Gamma_{\alpha}, \quad x_{\alpha}^* = \frac{x_{\alpha} R_0^2}{x_{\alpha}^2 + y_{\alpha}^2}, \quad y_{\alpha}^* = -\frac{y_{\alpha} R_0^2}{x_{\alpha}^2 + y_{\alpha}^2}. \quad (1.21)$$

Тоді система диференціальних рівнянь, що описуватиме рух системи N точкових вихорів усередині кругової площини, виглядатиме наступним чином

$$\begin{aligned} \frac{dx_{\alpha}}{dt} &= -\frac{1}{2\pi} \left\{ \sum_{\beta=1, \beta \neq \alpha}^N \frac{\Gamma_{\beta}(y_{\alpha} - y_{\beta})}{(x_{\alpha} - x_{\beta})^2 + (y_{\alpha} - y_{\beta})^2} - \sum_{\beta=1}^N \frac{\Gamma_{\beta}(y_{\alpha} - y_{\beta}^*)}{(x_{\alpha} - x_{\beta}^*)^2 + (y_{\alpha} + y_{\beta}^*)^2} \right\} \\ \frac{dy_{\alpha}}{dt} &= -\frac{1}{2\pi} \left\{ \sum_{\beta=1, \beta \neq \alpha}^N \frac{\Gamma_{\beta}(x_{\alpha} - x_{\beta})}{(x_{\alpha} - x_{\beta})^2 + (y_{\alpha} - y_{\beta})^2} - \sum_{\beta=1}^N \frac{\Gamma_{\beta}(x_{\alpha} - x_{\beta}^*)}{(x_{\alpha} - x_{\beta}^*)^2 + (y_{\alpha} - y_{\beta}^*)^2} \right\}. \end{aligned} \quad (1.22)$$

Система рівнянь 1.22 має тільки два інваріанти руху, що визначають закони збереження енергії та імпульсу рідини уздовж осі усередині площини.

Нехай в ідеальній рідині розташовано N точкових вихорів над нескінченною площиною, значення для інтенсивностей яких рівні $\Gamma_{\alpha} (\alpha = 1, \dots, N)$, дані вихори розташовані у точках із координатами (x_{α}, y_{α}) , що знаходяться поза круговою порожниною радіуса R у заданій зовнішній потенціальній течії ідеальної нестислої рідини зі швидкістю U_0 на нескінченності.

Тут система диференціальних рівнянь, які описують переміщення системи точкових вихорів усередині кругової площини матиме вигляд 1.22 в декартовій системі координат, пов'язаній із геометричним центром кола. В той же час до кожного із рівнянь 1.22 додаються компоненти поля швидкості зовнішньої течії, що мають наступний вигляд

$$U(x, y) = U_0 \left\{ 1 - \frac{R^2(x^2 - y^2)}{(x^2 + y^2)^2} \right\}, \quad V(x, y) = -U_0 \left\{ 1 - \frac{2R^2 xy}{(x^2 + y^2)^2} \right\}. \quad (1.23)$$

Інакше кажучи, точковий вихор, координати якого (x, y) буде виштовхуватися під дією зовнішньої течії зі швидкістю $U(x, y)$ вздовж вісі O_x і швидкістю $V(x, y)$ вздовж вісі O_y . Система рівнянь 1.23 матиме два інваріанти руху, які визначають закони збереження енергії і моменту імпульсу рідини.

Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз сучасної наукової літератури з проблеми перемішування рідин ламінарними течіями та проблеми еволюції нестійких динамічних систем, що проявляють хаотичні властивості. Визначено основні властивості, за якими ідентифікують хаотичність руху динамічних систем.

2. Виконано ідентифікацію властивостей деяких фізичних явищ і процесів, що супроводжуються утворенням хаотичних процесів. Виконано огляд існуючих режимів процесів перемішування рідини у внутрішніх течіях.

3. Проведено аналіз існуючих підходів з ідентифікації областей інтенсивного перемішування нестислої рідини. Виявлено основні підходи до опису процесів переносу суцільними середовищами, основні фізичні моделі і математичне формулювання задач процесу перемішування в рідких середовищах.

4. Розглянуто можливість виникнення хаотичного руху рідин у ламінарних течіях і проведено якісний аналіз експерименту, що підтверджує дане явище.

5. Проведено аналіз математичного формулювання задачі руху локалізованих вихрових структур у внутрішніх течіях. Вивчені основні властивості і закономірності рівнянь переносу вихорів та рівняння нерозривності.

2. АЛГОРИТМІЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕНСИВНОГО ПЕРЕМІШУВАННЯ РІДИНИ

Моделювання процесів перемішування рідини системою вихорів має на меті створення програмного продукту, що буде здатен симулювати поведінку рідини в процесі її перемішування. Також постає ціль обчислення критеріїв хаотичності руху ц динамічних системах. Для досягнення поставленої мети було розроблено алгоритм, що складається з наступних етапів (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Етапи виконання побудови критерію обчислювання

1) Перший етап – підготовчий. Він полягає у виборі користувачем критерію хаотичності руху, що буде побудовано.

2) Другий етап «Надсилання запиту з початковими умовами». Тут користувач вводить початкові дані про стан системи, що моделюється (початкові координати вихорів, їхня інтенсивність).

3) Протягом третього етапу відбувається обчислення обраних критеріїв – розв’язок задач Коші за допомогою чисельного методу Рунге-Куты-Фельдберга та надсилається результат обчислень у якості відповіді на отриманий в попередньому етапі запит.

4) На останньому етапі отримані дані зображуються на клієнтській частині програмного забезпечення засобами Canvas мови програмування JavaScript.

Розділ присвячено докладному опису алгоритмічної моделі запропонованого рішення задачі моделювання процесів перемішування рідини вихоровими структурами в колі.

2.1. Обґрунтування критеріїв ідентифікації хаотичних станів руху

На сьогодні розроблена велика кількість критеріїв, за допомогою яких можна виконати оцінку досліджуваної системи, чи присутнє у ній є явище динамічного хаосу. Дані критерії розмежовують на два незалежні класи: прогностичні критерії і діагностичні критерії.

Прогностичні критерії це множина критеріїв, проводячи оцінку за допомогою яких дослідник буде здатен зробити висновок, чи перебуває дана система в стані хаотичного руху. Ці критерії є підмножиною якісних критеріїв, які дають однозначну ствердну або негативну відповідь на поставлене питання.

Діагностичні критерії, в свою чергу, використовують для того, щоби визначити, чи перебувала досліджена система у стані хаотичного руху, перебуває на даний момент, чи перейде в хаотичний стан у майбутньому. Дані критерії є якісними, тобто за їхньою допомогою стає можливим визначити міру, за допомогою якої відбувається оприділення стану досліджуваної системи [38].

Найпростішим критерієм є живе дослідження за фізичною траєкторією рухів рідких частинок всередині рідини, де присутній процес перемішування. Зазвичай використовуються комп'ютерні симуляції або лабораторні експерименти, під час яких аналітик розглядає поведінку певних областей рідини, позначених маркером. Даний критерій є слабким, адже в його основі не закладені жодне точне математичні підґрунтя, він лише спирається на неформалізовані людські висновки.

Досить легким у розумінні серед існуючих якісних критеріїв є аналіз еволюції рідких частинок рідини на фазовій траєкторії. Фазова траєкторія це крива, що описує зміну стану об'єкту з плином часу в абстрактному математичному просторі, що складається із двох координат: фазові координати та фазові імпульси (в певних випадках використовуються фазові швидкості).

Наведемо приклад руху тіла в рамках однієї розмірності, його переміщення візьмемо за $x(t)$, швидкість візьмемо через $v(t)$. Представимо рівняння руху тіла згідно залежності прискорення тіла від рівнодіючих усіх прикладених до тіла сил

$$\dot{x} = v, \quad \dot{v} = \frac{1}{m}f(x, v, t), \quad (2.1)$$

тут m це маса тіла, f – сила, яка діє на тіло. Фазова площинна буде мати вигляд як множини точок (x, v) на площині (інколи замість швидкості v використовується імпульс mv). У випадку періодичного руху (рисунок 2.2), фазова траєкторія буде описувати на фазовій площині регулярну криву. Також, у свою чергу, вимушені коливання динамічних систем із присутнім пружним тілом у формі куба мають траєкторію, у якій буде присутнім перетин самої себе, але все одно дана крива буде регулярною. У даному випадку можливим є спостереження субгармонік.



Рисунок 2.2 – Приклад фазової траєкторії для вимушеного коливання з періодом 2 на фазовій площині

Динамічні системи, де відсутня явна залежність сили від часу, зокрема $f = f(x, v)$ у рівнянні 2.2, мають назву автономних. Рухи з періодичністю у автономних системах (за умови нульового впливу сторонніх гармонійних сил) має назву граничного циклу. Дані рухи будують регулярну криву на площині фазових координат.

У свою чергу, траєкторії хаотичний переміщень не являються регулярними кривими, прогноз подальшої поведінки даної кривої неможливий. Дані траєкторії займають певну область фазової площини, як можна спостерігати на рисунку 2.3. В

свою чергу дані зображення несуть досить малу інформацію про властивості хаотичного руху, тож даний метод необхідно використовувати в комплексі з іншими, більш наочними методиками.

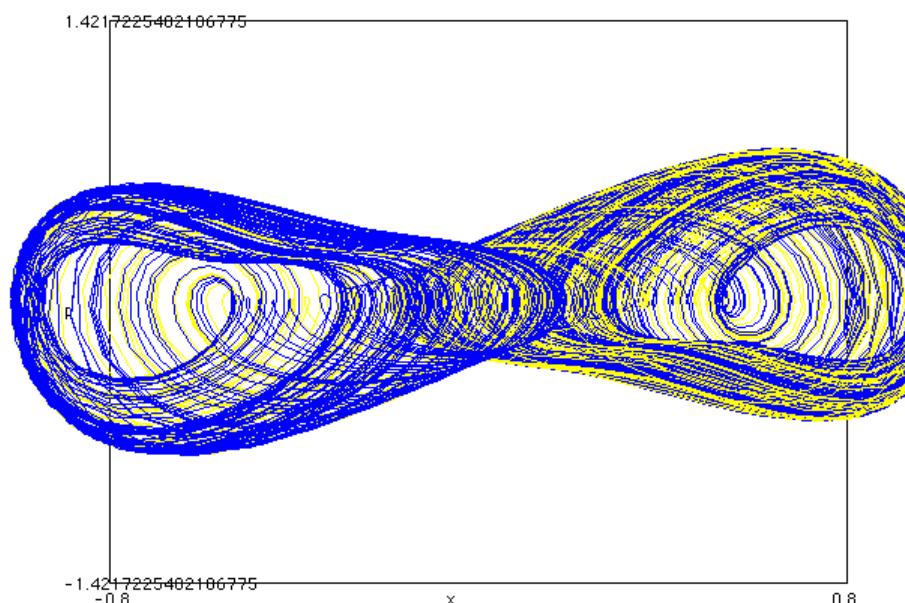


Рисунок 2.3 – Приклад фазової траєкторії для хаотичного руху маркера рідини у суцільному рідкому сереловищі

Критерієм, який суміщує в собі як і високу інформативність про стан системи з присутнім детермінованим хаосом так і незалежність від сторонніх похибок є метод дослідження систем побудовою перетинів Пуанкаре. Під час виконання аналізу динамічних систем під поняттям перетину розуміють вибірку значень за певний проміжок часу $[x(t_1), x(t_1), \dots, x(t_n), \dots, x(t_N)]$, де спрощують запис: $x_n \equiv x(t_n)$. За випадку звичайного детермінованого перетину, значення x_{n+1} обчислюється за допомогою величини x_n . Це записується у вигляді формули

$$x_{n+1} = f(x_n). \quad (2.2)$$

Даний запис являється нічим іншим як різностним рівнянням. Поняття перетину екстраполюється і на неодиначні кількості невідомих. Таким чином, x_n в свою чергу записують у вигляді вектору із M членами: $x_n = (Y_{1n}, Y_{2n}, \dots, Y_{Mn})$, що призводить до того, що 2.2 перетворюється на систему із M рівнянь.

Зробимо припущення, що виконується дослідження руху частинки, що зображено на фазовій площині $[x(t), \dot{x}(t)]$. З вищезазначеного відомо, що у разі хаотичного руху траєкторія частинки тяжіє до заповнення певної області фазової

площини. Якщо, на відміну від того, щоб неперервно відстежувати рух частинки, а лише записувати її координати у певні обрані моменти часу, то даний рух перетвориться на сукупність точок на фазовій площині простору фазових параметрів (рисунок 2.4).

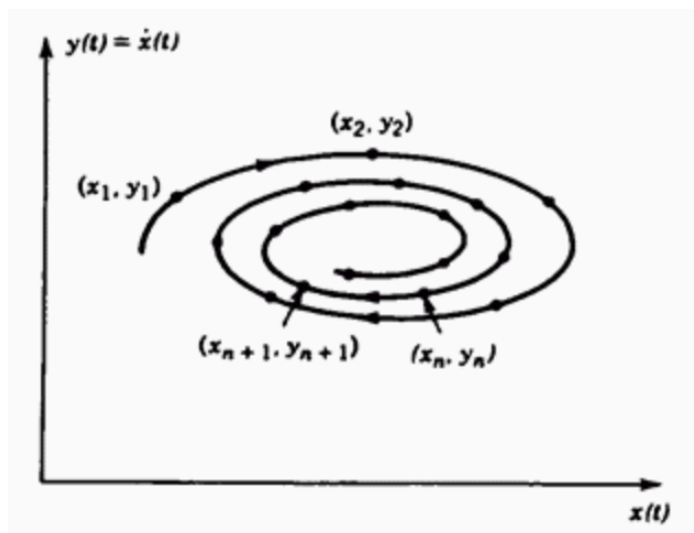


Рисунок 2.4 – Зображення вибірки точок фазової траєкторії зміни стану системи для побудови перетину Пуанкаре

Нехай позначено: $x_n \equiv x(t_n)$ і $y_n \equiv \dot{x}(t_n)$. В такому випадку отримана множина точок на площині записується відображення з двома розмірностями

$$x_{n+1} = f(x_n, y_n), y_{n+1} = g(x_n, y_n). \quad (2.3)$$

У тому разі, коли моменти для внесення точок на площину t_n будуть слідувати детермінованому закону, то дана множина точок на площині абстрактного математичного простору фазових координат буде мати наступну назву – перетин Пуанкаре.

Якщо в досліджуваній системі наявні вимушені коливання із періодом T , то для побудови перетину Пуанкаре логічним є визначення моменту запису точок $t_n = nT + \tau_0$. Таким чином буде зручно відмежувати періодичні рухи від неперіодичних. У випадку, коли момент запису точок перетину Пуанкаре для системи з гармонічним рухом, який зображено на рисунку 2.1 зробити синхронним із періодом даного руху, то перетин буде являти собою дві точки на площині фазового простору. Якщо ж за момент часу для відображення обрати період із субгармонікою з власним періодом, що дорівнює 3, то даний перетин Пуанкаре містив три точки на фазовій площині, як зображено на рисунку 2.5 [39].

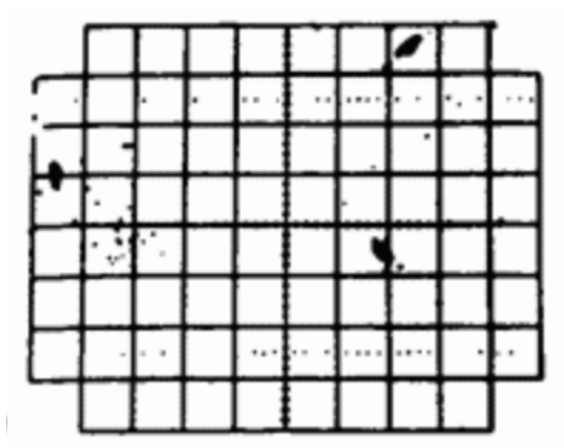


Рисунок 2.5 – Результат перетину Пуанкаре на фазовій площині, що відповідає субгармонічному рухові з періодом 3

Також наочний приклад перетину Пуанкаре для нехаотичного руху зображено на рисунку 2.6. Дані переміщення являють собою коливання із двома неспівставними частотами.

$$x(t) = C_1 \sin(\omega_1 t + d_1) + C_2 \sin(\omega_2 t + d_2) \quad (2.4)$$

Тут ω_1/ω_2 це ірраціональне число. У тому разі, коли робиться вибірка з періодом, який буде відповідати одній із частот, то траєкторія перетвориться на неперервну замкнену фігуру на фазовій площині. Даний тип руху динамічної системи також називається квазіперіодичним.

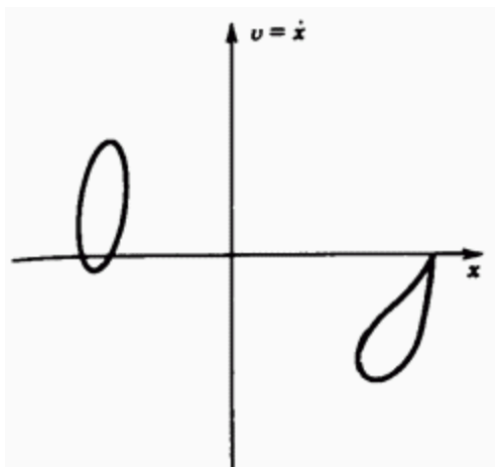


Рисунок 2.6 – Результат перетин Пуанкаре на площині фазового простору, де присутній квазіперіодичний рух динамічної системи

У тому разі, коли перетин Пуанкаре буде містити ані кінцеву кількість точок, ані дані точки будуть лягати на регулярну криву, рух, який було проаналізовано перетином Пуанкаре може мати хаотичний характер. Якщо в досліджуваній динамічній системі процес затухання відсутній або являється малим, то на перетину

Пуанкаре буде спостерігатися неупорядкована множина точок на площині фазового простору (рисунок 2.6).

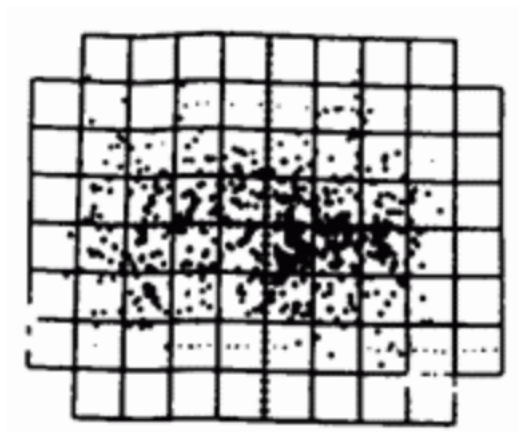


Рисунок 2.6 – Результат перетину Пуанкаре, де присутній хаотичний рух зі слабким затуханням

У хаотичних динамічних системах із наявним процесом поступового затухання побудований перетин Пуанкаре буде зображено у вигляді нескінченної кількості жорстко впорядкованих точок, які формують подобу певних паралельних кривих (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Результат перетину Пуанкаре, де присутній хаотичний рух із сильним затуханням

При виконанні чисельного модулювання для збільшення досліджуваної малої області перетину Пуанкаре можна спостерігати більш тонку структуру, де можливо присутній складний внутрішній порядок що криється за даною хаотичною множиною точок. У такому випадку кажуть, що даний рух динамічного середовища має поведінку дивного атрактора. Множини на перетині Пуанкаре з подібною вкладеністю однієї структури в іншу часто називають канторовими множинами.

Поява у перетинах Пуанкаре, що характеризують часову еволюцію коливань, структур, які можуть бути подібними до канторових множин, являються сильним індикатором хаотичності досліджуваної системи. Прикладами використання даної методики являються, наприклад, дослідження кранів, що протікають, експеримент із варикапним діодом у електричному ланцюгу. Перетин Пуанкаре також розповсюджується і на випадки, коли на систему діє періодична зовнішня сила.

Отже, перетин Пуанкаре дозволяє класифікувати рух динамічної системи, яку він описує:

1. у разі зображення на фазовій площині кінцевого набору точок спостерігається субгармонійне або гармонійне коливання;
2. у разі зображення замкненої кривої спостерігається квазіперіодичний рух у присутності несумірних частот;
3. у разі зображення фрактального набору точок спостерігається дивний атрактор у тривимірній фазовій площині;
4. у разі зображення неупорядкованої множини точок можуть спостерігатися:
 - динамічна система з великим випадковим сигналом або сигнальним шумом на вході, дивний атрактор із малим значенням затухання системи,
 - дивний атрактор на фазовій площині з більш, ніж трьома вимірами – для подальшого аналізу необхідно виконати декілька перетинів,
 - квазіперіодичний рух з трьома домінуючими частотами або більшою кількістю домінуючих частот.

2.2. Обґрунтування обраних характеристик для конфігурування моделі

Для кожного обраного критерія хаотичності системи, який необхідно обчислити постає завдання задання початкових умов, змінюючи значення котрих буде відкриватися можливість дослідження зміни стану системи. Дане положення є необхідним при конструюванні будь-яких фізичних моделей.

Під час моделювання фізичних траєкторій вихрових структур на круговій площині постає задача обчислення значень координат даних вихорів у обраний

проміжок часу. Згідно наведеним вище рівнянням 1.22, дана задача буде зводитися до вирішення задачі Коші для диференціальних рівнянь рухів вихорів на круговій площині із заданими початковими умовами.

Згідно математичного визначення поставленої задачі Коші, початковими умовами повинні бути координати на координатній площині для вихору в нульовий момент відліку часу. Також варіативними параметрами логічним було б визначити значення для інтенсивності усіх вихорів на круговій площині а також значення радіуса кругової площини для досліджуваної моделі.

Даний критерій хаотичності для руху рідини в суцільному середовищі являється тісно пов'язаним із візуальним спостереженням дослідниками поведінки вихорів у динаміці. В такому випадку точність можливого висновку буде прямо залежати від обраного часу проведення цього дослідження. Отже, можливість зміни проміжку часу, який буде виконуватися моделювання фізичних траєкторій також є змінним.

Тож, для успішного моделювання фізичних траєкторій вихорових структур у рідині на круговій площині необхідно вказати значення для наступних початкових умов задачі:

- кількість вихорів на досліджуваній круговій площині;
- координати на вісі абсцис для кожного із заданих вихорів;
- координати на вісі ординат для кожного із заданих вихорів;
- значення жорсткості для кожного із заданих вихорів;
- значення радіусу кругової площини для досліджуваної моделі;
- проміжок часу, який буде виконуватися моделювання процесу перемішування рідини вихоровими структурами.

Під час процесу побудови фазових траєкторій вихрових структур на круговій площині постає задача обчислення значень координат даних вихорів на фазовій площині у обраний користувачем момент часу. Згідно наведеною вище системою рівнянь рухів системи N точкових вихорів на круговій площині (рівняння 1.22), отримана задача буде зводитися до вирішення задачі Коші для диференціальних рівнянь рухів точкових вихорів на заданій круговій площині із заданими початковими умовами.

Згідно із отриманого математичного визначення поставленої вище задачі Коші для диференціальних рівнянь, що описують рух вихорів на круговій площині, початковими умовами задачі необхідно визначити координати на координатній площині для вихору в нульовий момент відліку часу. Також варіативними параметрами логічним було б визначити значення для інтенсивності усіх вихорів на круговій площині а також значення радіуса кругової площини для досліджуваної моделі.

Наочність обраного критерію – фазової траєкторії вихору на фазовій площині прямо залежить від довжини часового відрізка, під час якого буде відбуватися побудова фазової траєкторії. Якщо час, обраний для процесу побудови фазової траєкторії буде замалим, то, у випадку нехаотичного руху, крива траєкторії буде незамкненою, що може бути хибно інтерпретовано, як ознаку хаотичного руху. Також, якщо рух буде хаотичним, при недостатньо великому розміру часу, що охоплюється, може виглядати схоже на фазову траєкторію вихору при нехаотичному русі.

Можна зробити висновок, що у такому випадку точність можливого результату аналізу буде прямо залежати від обраного часу проведення цього дослідження. Отже, можливість зміни проміжку часу, який буде охоплюватися для побудови фазових траєкторій вихорів на фазовій площині також повинен бути змінним.

Тож, для успішного моделювання фазових траєкторій вихорових структур у рідині на круговій площині необхідно вказати значення для наступних початкових умов задачі:

- кількість вихорів на досліджуваній круговій площині;
- координати на вісі абсцис для кожного із заданих вихорів;
- координати на вісі ординат для кожного із заданих вихорів;
- значення жорсткості для кожного із заданих вихорів;
- значення радіусу кругової площини для досліджуваної моделі;
- проміжок часу, що буде використано при побудові фазових траєкторій точкових вихорів на фазовій площині.

Під час побудови перетинів Пуанкаре на фазовій площині виникають задачі встановлення координат вихорів на досліджуваній круговій площині, задача

визначення моменту часу, в який один із вихорів буде перетинати вісь ординат у додатному напрямі, а також визначення положення обраного маркеру рідини у даний момент часу. Для обчислення положень вихорів та маркера необхідно використати рівняння 1.22 – систему рівнянь рухів N точкових вихорів на круговій площині, окремо систему рівнянь для вихорів і окремо диференціальні рівняння для маркеру рідини. Отримана в результаті цього приведення задача буде зводитися до вирішення задачі Коші для диференціальних рівнянь рухів точкових вихорів на заданій круговій площині із заданими початковими умовами.

Згідно із отриманого математичного визначення поставленої вище задачі Коші для диференціальних рівнянь, що описують рух вихорів на круговій площині, початковими умовами задачі необхідно визначити координати на координатній площині для вихору в нульовий момент відліку часу. Також варіативними параметрами логічним було б визначити значення для інтенсивності усіх вихорів на круговій площині а також значення радіуса кругової площини для досліджуваної моделі.

Точність обраного критерію – перетину Пуанкаре на фазовій площині для маркеру рідини буде прямо залежати від довжини часового відрізка, під час якого буде відбуватися побудова даного перетину Пуанкаре. Якщо час, обраний для процесу побудови перетину Пуанкаре буде замалим, то, у випадку хаотичного руху, множина точок на фазовій площині буде замалою, і результат буде зображенням, що можна помилково прийняти за випадок, де хаотичний рух у системі перемішування рідини буде відсутнім.

Можна зробити висновок, що у такому випадку точність можливого результату аналізу буде прямо залежати від обраного часу проведення цього дослідження. Отже, можливість зміни проміжку часу, який буде охоплюватися для побудови перетинів Пуанкаре на фазовій площині також повинен бути змінним.

Тож, для успішної побудови перетину Пуанкаре для маркеру рідини при моделюванні процесів перемішування системи вихорових структур у рідині на круговій площині, необхідно зазначити значення для наступних початкових умов задачі:

- кількість вихорів на досліджуваній круговій площині;

- координати на вісі абсцис для кожного із заданих вихорів;
- координати на вісі ординат для кожного із заданих вихорів;
- координата на вісі абсцис для заданого маркеру,
- координата на вісі ординат для заданого маркеру,
- значення радіусу кругової площини для досліджуваної моделі;
- значення жорсткості для кожного із заданих вихорів;
- проміжок часу, який буде виконуватися моделювання процесу перемішування рідини вихоровими структурами.

2.3. Алгоритм чисельного вирішення задачі Коші

Під час обчислення критеріїв для надання оцінки хаотичності рухів при процесі перемішування рідини вихоровими структурами в колі неодноразово виникала проблема вирішення задачі Коші. При обчисленні даної задачі математичної фізики використовують різноманітні чисельні методи.

Чисельні методи – методи приблизного або точного вирішення задач прикладної математики, що базуються на виконанні дій над множиною чисел. Серед вимог до даних методів є: стійкість, збіжність.

Основними задачами чисельних методів є:

- обчислення систем лінійних рівнянь
- інтерполяція
- приблизне обчислення функцій
- чисельне інтегрування
- чисельне обчислення систем нелінійних рівнянь
- чисельне обчислення звичаних диференціальних рівнянь
- чисельне обчислення рівнянь у часткових похідних (рівнянь математичної фізики)
- вирішення задач оптимізації

Інтерполяцією в чисельній математиці називають метод знаходження проміжних значень певної величини по вже існуючому дискретній сукупності відомих значень [40].

Існує також близька до інтерполяції задача, що заключається в апроксимації будь-яких складних функцій іншою, більш простою функцією. Якщо деяка функція занадто складна для виконання обчислень, можна спробувати обчислити її значення у деяких точках, а вже по ним побудувати, тобто інтерполювати, більш просту функцію.

Рівняння типу $y = A(x)$, визначене на функціональній площині, може вмішувати оператори диференціювання, для яких не є можливим знайти точне рішення. Методи чисельного диференціювання працюють на базі інтерполяції.

Похідну основної функції вважають наближено рівною похідній інтерполуючої функції, при цьому похідна залишкового члену інтерполяційної формули може мати велике значення, особливо для похідних вищих порядків. Формули чисельного диференціювання багато в чому засновані на безпосередньому диференціюванні інтерполяційних формул Ньютона, Гауса, Стірлінга, а також Беселя, побудованих на розподілених різницях.

У той же час існують безрізницеві формули для чисельних методів вирішення задач диференціювання. Зокрема, в тому випадку, коли для числового диференціала використовується безпосередньо формула Лагранжа для рівних проміжків, метод невизначених коефіцієнтів, а також інші.

Сучасний стан розвитку обчислювальних ресурсів персональних комп'ютерів і ноутбуків дозволяє виконувати чисельний аналіз даної проблеми дуже точними методами, які раніше виконувалися на спеціалізованих кластерах. Одним із таких чисельних методів вирішення задачі Коші для системи рівнянь являється чисельний метод Рунге-Кута-Фельберга.

$$x_\alpha = x_\alpha^0, y_\alpha = y_\alpha^0, t^0 = 0$$

Загалом методи Рунге-Кута це великий клас чисельних методів рішення задач Коші для звичайних диференціальних рівнянь а також їх систем. Перші методи цього класу були запропоновані приблизно 1900 року німецькими математиками К. Рунге і М.В. Кutoю.

До класу методів Рунге-Куті відносяться явний метод Ейлера і модифікований метод Ейлера з виконанням перерахунку, котрі являють собою відповідно методи

першого та другого порядку точності. Існують стандартні явні методи третього порядку точності, що не зазнали широкого застосування.

Найбільш часто використовуються та реалізовані в різних математичних пакетах MathCAD, Maxima, Maple, тощо, класичний метод Рунге-Кути, що має четвертий порядок точності. При виконанні математичних розрахунків із підвищеною точністю усе частіше застосовуються методи п'ятого та шостого порядків точності. Побудова схем більш високого порядку зустрічає на своєму шляху значні обчислювальні складності.

Нижче наведена постановка задачі Коші а також алгоритм чисельного методу Рунге-Кута-Фельберга. Нехай необхідно вирішити систему звичайних диференціальних рівнянь типу

$$\frac{dy_i}{dt} = F_i(t, y_i), \quad i = 1, \dots, N \quad (2.5)$$

з початковими умовами

$$y_i(0) = y_i^0. \quad (2.6)$$

Алгоритм вирішення задачі Коші на проміжку часу від t до $t + h$ і поточних значень y_i зводиться до виконання наступних дій:

1. обчислення перших опорних значень похідних у момент t

$$\frac{dy_i^{(0)}}{dt} = F_i(t, y_i); \quad (2.7)$$

2. обчислення функцій $K_i^{(0)}$ для $i = 1, \dots, N$

$$K_i^{(0)} = h \frac{dy_i^{(0)}}{dt}; \quad (2.8)$$

3. обчислення других опорних значень похідних у момент $t + 2h/9$

$$\frac{dy_i^{(1)}}{dt} = F_i\left(t + \frac{2h}{9}, y_i + \frac{2}{9} K_i^{(0)}\right); \quad (2.9)$$

4. обчислення функції $K_i^{(1)}$ для $i = 1, \dots, N$

$$K_i^{(1)} = h \frac{dy_i^{(1)}}{dt}; \quad (2.10)$$

5. обчислення третіх опорних значень похідних у момент $t + h/3$

$$\frac{dy_i^{(2)}}{dt} = F_i \left(t + \frac{1}{3}h, y_i + \frac{1}{12}K_i^{(0)} + \frac{1}{4}K_i^{(1)} \right); \quad (2.11)$$

6. обчислення функції $K_i^{(2)}$ для $i = 1, \dots, N$

$$K_i^{(2)} = h \frac{dy_i^{(2)}}{dt}; \quad (2.12)$$

7. обчислення четвертих опорних значень похідних у момент $t + 3h/4$

$$\frac{dy_i^{(3)}}{dt} = F_i \left(t + \frac{3}{4}h, y_i + \frac{69}{128}K_i^{(0)} - \frac{243}{128}K_i^{(1)} + \frac{135}{64}K_i^{(2)} \right); \quad (2.13)$$

8. обчислення функції $K_i^{(3)}$ для $i = 1, \dots, N$

$$K_i^{(3)} = h \frac{dy_i^{(3)}}{dt}; \quad (2.14)$$

9. обчислення п'ятих опорних значень похідних у момент $t + h$

$$\frac{dy_i^{(4)}}{dt} = F_i \left(t + h, y_i - \frac{17}{12}K_i^{(0)} + \frac{27}{4}K_i^{(1)} - \frac{27}{5}K_i^{(2)} + \frac{16}{15}K_i^{(3)} \right); \quad (2.15)$$

10. обчислення функції $K_i^{(4)}$ для $i = 1, \dots, N$

$$K_i^{(4)} = h \frac{dy_i^{(4)}}{dt}; \quad (2.16)$$

11. обчислення значення рішення задачі Коші у момент $t + h$ для $i = 1, \dots, N$

$$y_i(t + h) = y_i + \frac{1}{9}K_i^{(0)} + \frac{9}{20}K_i^{(2)} + \frac{16}{45}K_i^{(3)} + \frac{1}{12}K_i^{(4)}. \quad (2.17)$$

Даний чисельний метод дозволяє виконати обчислення задачі Коші з точністю, достатньою щоб на її основі виконати моделювання процесів перемішування рідини вихоровими структурами в коловій площині. Також дані значення будуть достатньо точними для побудови перетинів Пуанкаре, фазових траєкторій, тощо.

На превеликий жаль, явні методи Рунге-Кути, як правило, не підходять для вирішення жорстких рівнянь через малу область їхньої абсолютної стійкості. Нестійкість явних методів Рунге-Кути створює досить серйозні проблеми при чисельному обчисленні диференціальних рівнянь у часткових похідних.

Нестійкість явних методів Рунге-Кути призвела до створення неявних методів. Неявний метод Рунге-Кути має вигляд

$$y_{n+1} = y_n + h \sum_{i=1}^s b_i k_i, \quad (2.18)$$

де

$$k_i = f \left(x_n + c_i h, y_n + h \sum_{j=1}^s a_{ij} k_j \right), \quad i = 1, \dots, s. \quad (2.19)$$

Явний метод являється характерним тим, що матриця коефіцієнтів a_{ij} для нього буде мати трикутну форму (включаючи і нульову головну діагональ) – на відміну від неявного методу, де матриця буде мати довільний вигляд. Наслідком із цієї відмінності є необхідність на кожному кроці вирішувати систему рівнянь для k_i , $i = 1, \dots, s$, де s – число стадій.

Це збільшує витрати при виконанні обчислень, але при достатньо малому значенню h можна застосувати принцип стискуючих відображень і обчислювати дану систему методом простих ітерацій. У випадку однієї ітерації, витрати на обчислювання зростають лише в два рази.

Перевагою неявних методів Рунге-Кути в порівнянні із явними є їхня більша стійкість, що є особливо важливим при обчислюванні жорстких рівнянь. Розглянемо в якості прикладу лінійне рівняння $y' = \lambda y$. Звичайний метод Рунге-Кути, застосований до даного рівняння, буде зводитися до ітерації $y_{n+1} = r(h\lambda)y_n$ з r , рівним

$$r(z) = 1 + zb^T(I - zA)^{-1}e = \frac{\det(I - zA + zeb^T)}{\det(I - zA)}, \quad (2.19)$$

де e означає вектор-стовпчик із одиниць.

Функція r називається функцією стійкості. З формули видно, що r являється відношення двох поліномів степеню s , якщо метод має s стадій. Явні методи мають строго трикутну матрицю A , з чого слідує, що $\det(I - zA) = 1$, а також те, що функція стійкості є багаточленом.

Чисельний розв'язок даного прикладу дає чистий нуль за умови $|r(z)| < 1$ з $z = h\lambda$. Множина таких r називають областю абсолютної стійкості. В тому числі, метод називається A -стійким, якщо усі r з $\operatorname{Re}(z) < 0$ знаходяться в області абсолютної

стійкості. Функція стійкості явного методу Рунге-Кути являється багаточленом, тому явні методи Рунге-Кути не можуть бути A -стійкими за строгим математичним визначенням.

В тому разі, коли метод має порядок p , то функція стійкості задовольняє умовам $r(z) = e^z + O(z^{p+1})$ при $z \rightarrow 0$. Таким чином, дуже цікавим є описані відношення багаточленів даного ступеню, що наближують експоненціальну алгебраїчну функцію найкращим чином. Необхідно уважно дослідити дані відношення багаточленів, визначити певні закономірності.

Ці відношення відомі як апроксимації Паде. Апроксимація Паде з чисельником степені m і знаменником ступеню n A -стійка тоді і тільки в тому випадку, коли $m \leq n \leq m + 2$.

s -стадійний метод Гауса-Лежандра має порядок $2s$, тому його функція стійкості являється наближенням Паде $m = n = s$. З цього слідує, що метод являється A -стійким.

Це вказує, що A -стійкі методи Рунге-Кути можуть мати який завгодно високий порядок. На відміну від цього порядок A -стійкості методів Адамса не може перевищувати два.

Оскільки розроблюваний програмний продукт орієнтується на некластерні обчислювальні системи, то використання описаних вище явних чисельних методів, направлених на вирішення задач Коші, буде недоцільним. Час виконання даних обчислень буде нівелювати будь-яку можливість провести достовірне моделювання виконання процесів перемішування рідини вихоровими структурами в круговій площині.

Оскільки побудовані задачі Коші для рівнянь руху вихорів на круговій площині не будуть містити жорсткі системи, достатнім є використання явних чисельних методів обчислення задачі Коші, зокрема вищезгаданий чисельний метод Рунге-Кута-Фельберга. Даний метод здатен забезпечити достатню швидкість обчислювання значень, що будуть використовуватися в процесі побудови моделі системи змішування рідини вихорами на круговій площині, на обчислювальних системах некластерної природи. Його використання є доцільним, він здатен забезпечити найкраще відношення «швидкість до точності».

Висновки до розділу 2

1. Було визначено алгоритм для виконання обчислення та побудови критеріїв ідентифікації стану інтенсивного перемішування рідини в досліджуваній моделі з вихорами на круговій площині. Алгоритм складається із наступних кроків:
 1. виконується вибір критерію, що необхідно обчислити
 2. задаються початкові умови та надсилається запит до серверу, на якому будуть виконуватися обчислення
 3. встановлюються рішення до задачі Коші, які необхідно обчислити для обраного критерію
 4. виконується побудова геометричних об'єктів із результатами обчислень значень даних критеріїв.
2. Обґрунтовано вибір і сформовано алгоритм побудови наступних критеріїв ідентифікації хаотичного руху рідких частинок у рідинах:
 1. фізична траєкторія вихорів;
 2. фазова траєкторія вихорів;
 3. перетин Пуанкаре для маркеру рідини.Також було наведено опис і визначення заданих критеріїв.
3. Описано чисельні методи для розв'язку задачі Коші методами Рунге-Кута, розглянуто явні та неявні підвиди чисельних методів Рунге-Кута. Було описано алгоритм методу Рунге-Кута-Фельдберга. Також було надано обґрунтування вибору даного методу для обчислень систем диференціальних рівнянь у створюваному програмному забезпеченні.

3. ОПИС ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕМІШУВАННЯ РІДИНИ ВИХРОВИМИ ПОТОКАМИ НА КРУГОВІЙ ПЛОЩИНІ

В даному розділі наведено опис функціональності, яку надає створений програмний продукт із моделювання процесів перемішування рідини системою вихорів на круговій площині. Далі надається огляд архітектурних рішень, що були використані при проектуванні даного програмного забезпечення, було обґрунтовано використаних засобів розробки. Також у даному розділі була наведена методика для користувача при роботі зі створеним програмним продуктом.

3.1. Функціональність системи

Перелік функціональних можливостей створеного програмного продукту з моделювання процесів перемішування рідини системою вихорів на круговій площині можна спостерігати на наведеній діаграмі прецедентів (див. рисунок 3.1). Ключові можливості, що пропонуються програмним забезпеченням можна визначити наступними прецедентами:

- вхід у програму;
- вибір типу моделі, що має бути обчислена та побудована;
- автоматичне задання початкових параметрів модельованої системи, що були введені попереднього разу;
- задання кількості вихорів на круговій площині в кількості від одного до трьох;
- задання початкових координат для вихорів на круговій площині;
- задання значень жорсткості для кожного з вихорів;
- задання значення радіусу досліджуваної кругової площини;
- задання тривалості часу, який буде використано при моделюванні або обчисленні критерію;
- моделювання руху вихорів на круговій площині під час процесу перемішування

- відображення фазової траєкторії для обраної рідкої частинки;
- відображення перетину Пуанкаре для обраної рідкої частинки.

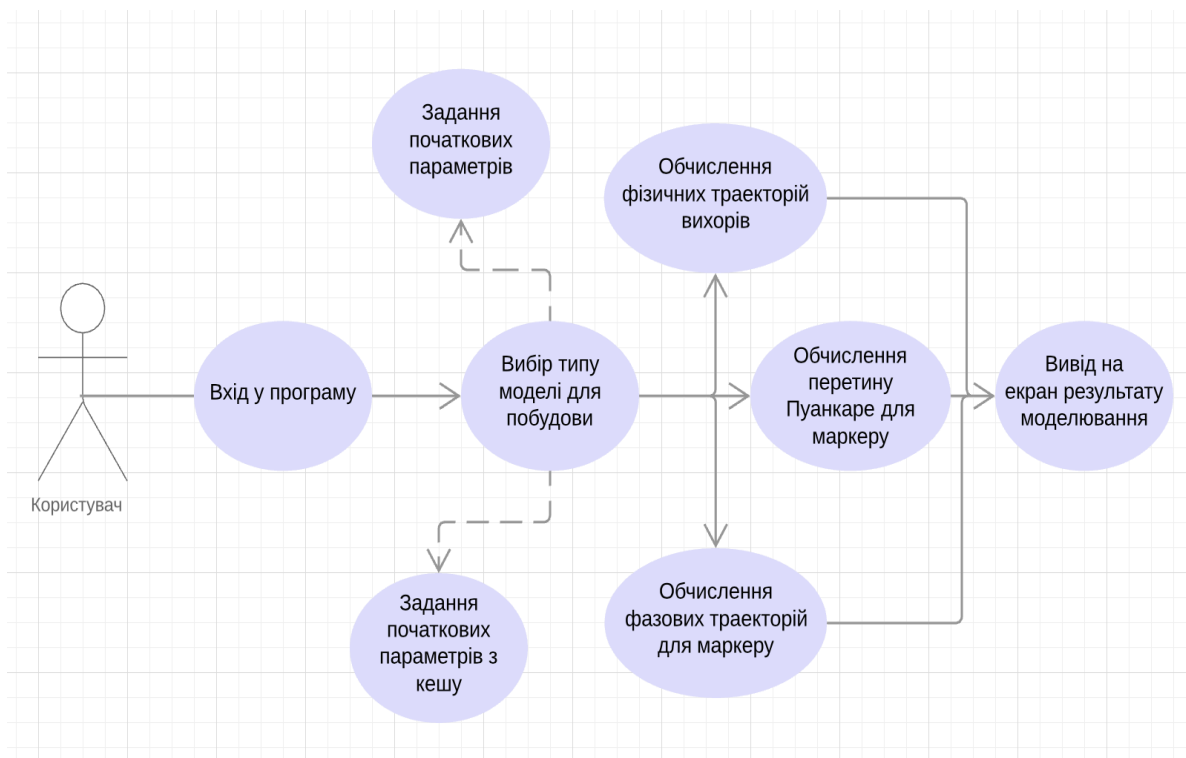


Рисунок 3.1 – Діаграма прецедентів

Під прецедентом «Вхід у програму» розуміється факт переходу користувачем до веб-сторінки в браузері, за адресою, на яку був виконаний деплой веб-сервера застосунків.

В прецеденті «Вибір типу моделі для побудови» кінцевий користувач обирає модель, яку він хоче побудувати – модель фізичних траєкторій системи вихорів, що оновлюється в реальному часі, фазову траєкторію рідкої частинки або перетин Пуанкаре для неї.

Під прецедентом «Задання початкових параметрів з кешу» мається на увазі випадок, коли користувач вже виконував попереднє моделювання для даного типу моделі, та хоче виконати моделювання з тими ж параметрами. Кожні нові початкові значення системи записуються в кеш та встановлюються замовчуванням при переході на сторінку введення початкових значень.

В прецеденті «Задання початкових параметрів» описується сценарій, коли користувач вводить свої початкові значення для системи, що буде моделюватися, які відрізняються від попередніх.

В прецеденті «Обчислення фізичних траєкторій вихорів» відбувається обчислення значень координат для вихорів із заданими початковими координатами для кожного з моментів часу для інтервалу часу, який буде виконуватися моделювання процесу перемішування рідини.

В прецеденті «Обчислення фазових траєкторій для маркеру» відбувається процес обчислення значень координат для фазової траєкторії обраної рідкої частинки із заданими початковими умовами змодельованої системи для кожного з моментів часу для інтервалу часу, який буде виконуватися моделювання процесу перемішування рідини.

В прецеденті «Обчислення перетину Пуанкаре для маркеру» відбувається процес обчислення значень координат для множини точок, які формують даний перетин обраної рідкої частинки із заданими початковими умовами змодельованої системи, для інтервалу часу, який буде виконуватися моделювання процесу перемішування рідини.

В прецеденті «Вивід на екран результату моделювання» виконується побудова графічного зображення, з можливістю оновлення зображення у випадку моделювання руху точкових вихорів на круговій площині, що відповідає попереднім результатам обчислень.

Після виконання аналізу сценаріїв використання проектованого програмного забезпечення було розроблено функціональну модель для системи моделювання процесу перемішування рідини системою вихорів у круговій площині (рисунок 3.2). Дана модель виділяє три основні групи функціональностей програмного забезпечення, що проектується.

Перша група – обробка вхідних даних. Тут описана функціональність, яка пов'язана із діями, які виконуються над початковими даними, які було введено користувачем. Нижче наведено перелік даних функціональностей:

- завантаження у кеш – тут описана функціональність збереження попередніх введених початкових даних системи, яка буде моделюватися, до кешу з подальшої можливістю доступу до цих даних;
- посилення запиту з вхідними даними – дана функціональність описує надсилання HTTP запиту до веб-серверу, на якому відбуватиметься процес

обчислення, із отриманими початковими даними системи, яка буде моделюватися.

Друга група – обчислення значень для моделей. Тут наведено перелік функціональних можливостей створюваного програмного забезпечення, що пов'язані з діями на веб-сервері над переданими початковими даними модельованої системи. Нижче наведено перелік даних функціональних можливостей:

- виконання обчислень даних чисельними методами – тут описана функціональність виконання розрахунків над переданими початковими параметрами системи з процесами перемішування рідини, що буде моделюватися, за допомогою чисельних методів;
- надсилання відповіді на запит із обчисленими результатами – тут описана функціональність передачі відповіді на надісланий HTTP запит із початковими параметрами модельованої системи. У якості відповіді на запит будуть передані значення, які були обчислені вище.

Третя група – вивід результату. Тут наведено перелік функціональних можливостей створюваного програмного забезпечення, що пов'язані з побудовою графічних об'єктів результатів обчислення. Нижче наведено перелік даних функціональних можливостей:

- побудова фазової траєкторії маркеру – тут описана функціональність виведення на екран фазової траєкторії обраної рідкої частинки в системі вихорів на круговій площині на основі значень, що були надіслані в якості відповіді на HTTP запит;
- побудова перетину Пуанкаре маркеру – тут описана функціональність виведення на екран результатів перетину Пуанкаре для рідкої частинки в системі вихорів на круговій площині на основі значень, що були надіслані в якості відповіді на HTTP запит;
- виведення руху вихорів у реальному часі – тут описана функціональність моделювання фізичних траєкторій системи вихорів у круговій площині в реальному часі, положення яких на координатній площині взято з даних, що були надіслані в якості відповіді на HTTP запит;



Рисунок 3.2 – Функціональна модель

3.2. Архітектура програмного продукту

Створений програмний продукт являється веб-застосунком. Він розділяється на дві частини: клієнтський застосунок (front-end) і серверний застосунок (back-end). Дана обрана архітектура забезпечує кросплатформність – неважливо який пристрій або операційна система є у користувача, достатньо мати встановлений веб-браузер з якого виконується перехід на веб-сайт, на якому розгорнуте програмне забезпечення. Також дана архітектура дозволяє різним користувачам одночасно користуватися створеним програмним забезпеченням незалежно один від одного.

Окрім переваг легкого розповсюдження програмного забезпечення та одночасної роботи для багатьох користувачів, веб-архітектура спрощує можливість масштабування для даної системи. Це є актуальним, оскільки створене програмне забезпечення активно використовує високонавантажені обчислення для виконання моделювання. Замість того, щоб розробляти нову версію програмного продукту та розповсюджувати її посеред користувачів, існує можливість розгортання даної системи на веб-серверах із більшою продуктивністю обчислень або використання хмарних технологій для складних обчислень.

Для серверної частини програмного продукту було використано стек технологій, що базується на архітектурі JavaVirtual Machine. Для клієнтської частини було обрано технології на базі мови програмування JavaScript. Архітектуру програмного забезпечення можна спостерігати на рисунку 3.3.

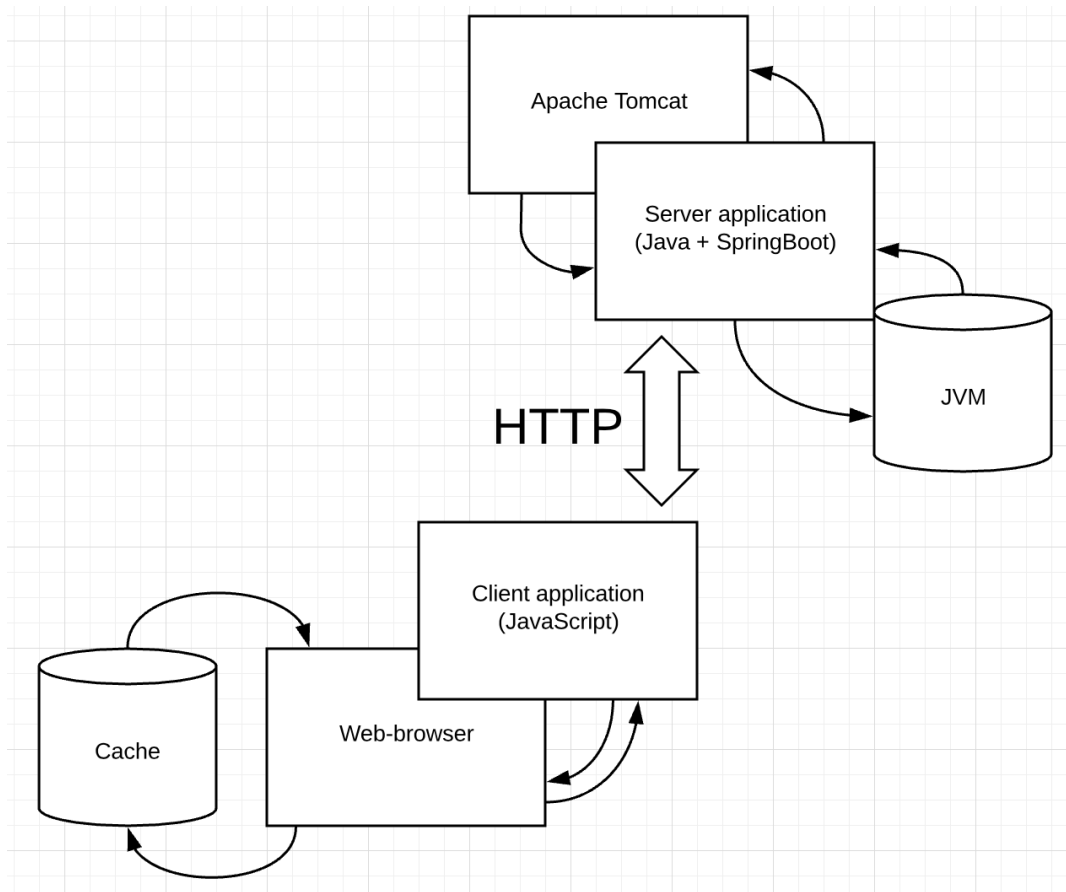


Рисунок 3.3 – Архітектура програмного забезпечення

Логіка серверної частини програмного забезпечення була написана на мові програмування Java. Даний вибір базується на великій кількості інструментів, які створені для зручності розробки на даній мові програмування.

У якості фреймворка, що використано для розробки веб-компонентів програмного забезпечення, а також контейнера для конфігурацій було використано SpringBoot. Даний фреймворк пропонує широкий спектр покращень для роботи з веб-технологіями на мові Java.

Оскільки функціональні сценарії використання даного програмного продукту не передбачають збереження станів і даних програми на час між її виконанням, база даних не є необхідною. Для збереження внутрішніх об'єктів використовується оперативна пам'ять, яка керується Java Virtual Machine.

Java Virtual Machine – віртуальна машина Java - основна частина виконуючої системи Java, так званої Java Runtime Environment (JRE). Віртуальна машина Java виконує байт-код Java, попередньо створений з висхідного тексту Java-програми компілятором Java (javac).

JVM також може використовуватися для виконання програм, написаних на інших мовах програмування. Наприклад висхідний код, написаний на мові Ada може бути скомпільований у байт-код Java, котрий потім може виконатися за допомогою JVM.

JVM являється ключовою компонентою платформи Java. Так, як віртуальні машини Java доступні для багатьох апаратних і програмних платформ, Java може розглядатися і як пов'язуюче програмне забезпечення і як самостійна платформа. Використання одного байт-коду для багатьох платформ дозволяє описати Java як «скомпільований один раз, можливо запускати де завгодно» (compile once, run anywhere).

Віртуальні машини Java зазвичай вміщують інтерпретатор байт-коду, але, у свою чергу, для покращення процесингу у багатьох машинах також застосовується JIT-компіляція часто виконуваних фрагментів байт коду у машинний код.

Програми, які призначаяються для запуску на JVM, повинні бути скомпільовані у стандартизованому переносному двійковому форматі, який зазвичай представляється у вигляді файлів «.class». Програма може складатися з декількох класів, розміщених у різноманітних файлах. Для полегшення розміщення великих програм, частина файлі виду «.class» може бути запакована разом у так називаємому «.jar» фалі (скорочено від «Java Archive»).

Віртуальна машина JVM виконує файли «.class» і «.jar» емулюючи присутні в них інструкції наступними шляхами:

- інтерпертування;
- використання JIT-компілятора.

У наші дні JIT-компіляція використовується у більшості JVM для досягнення більшої швидкості. Існують також ahead-of-time компілятори, що дозволяють розробникам застосувань перекомпілювати файли класів у рідній для конкретної платформи код.

Для збірки Java проектів у один файл було використано засіб збірки проектів Apache Maven. Він дозволяє створювати полегшені артефакти за рахунок невиключення бібліотек засобом запису посиланні на них у спеціальних репозиторіях. Далі кожен користувач буде локально завантажувати дані бібліотеки під час розгортання проекту на своєму локальному середовищі.

Також даний засіб дозволяє запускати окремо юніт-тести, а також визначати версії побудованих артефактів. Apache Maven використовує мову шаблонів XML для виконання конфігурування проектів. На сьогоднішній день дана технологія є найпопулярнішою серед існуючих засобів управління проектами на мові Java. Дане твердження підтверджується широким спектром доступних бібліотек у різних maven-репозиторіях.

Клієнтська частина програмного забезпечення була написана на мові програмування JavaScript. Даний вибір спричинений активним розвитком даної мови, для неї впроваджуються найновіші практики, а також створюється велика кількість супутніх технологій. Дана мова є мультипарадигмова, що дозволяє значно швидше виконувати розробку на ній, ані на класичній об'єктно-орієнтованій мові програмування.

Клієнтський застосунок запускається з веб-браузера. Серед можливостей веб-браузера, при створенні програмного продукту, була використана можливість кешування даних – збереження даних у пам'яті веб-браузера, з подальшою можливістю їх використання в новій сесії. Також веб-браузер дозволяє виконувати праці з історією переходів сторінок простим чином.

При розробці архітектури програмного забезпечення було передбачено обробку наступних HTTP запитів:

- GET /physical-model – виконується перехід на сторінку моделювання руху вихорів у круговій площині, заповнюються початкові умови системи з кешу браузера;
- GET /phase-trajectory – виконується перехід на сторінку побудови фазової траєкторії рідкої частинки у круговій площині, що переміщується системою точкових вихорів, також заповнюються початкові умови системи з кешу браузера;

```

1 {
2   "radius":(double),
3   [
4     {
5       "x":(double),
6       "y":(double),
7       "intensity":(double)
8     },
9     ...
10  ]
11  "time":(long)
12 }

```

Рисунок 3.4 – Структура JSON для значень, що надсилаються в тілі HTTP запиту POST /physical-model

і для отримуваних значень зазначена на рисунку 3.5;

```

1 {
2   [
3     [
4       {
5         "x":(double),
6         "y":(double),
7         "time":(long)
8       },
9       ...
10    ],
11    ...
12  ]
13 }

```

Рисунок 3.5 – Структура JSON для значень, що отримуються в тілі після HTTP запиту POST /physical-model

- POST /phase-trajectory – виконується запит з переданими початковими умовами для обчислення значень координат точок, що складають фазову траєкторію рідкої частинки, структура JSON для надісланих значень зазначена на рисунку 3.6
- GET /poincare-map – виконується перехід на сторінку побудови перетину Пуанкаре рідкої частинки у круговій площині, що переміщується системою точкових вихорів, також заповнюються початкові умови системи з кешу;
- POST /physical-model – виконується запит з переданими початковими умовами для обчислення значень координат системи вихорів, структура JSON для надісланих значень зазначена на рисунку 3.4
- GET / - виконується перехід на головну сторінку;

```

1 {
2     "radius":(double),
3     [
4         {
5             "x":(double),
6             "y":(double),
7             "intensity":(double)
8         },
9         ...
10    ],
11    {
12        "x":(double),
13        "y":(double)
14    }
15    "time":(long)
16 }

```

Рисунок 3.6 – Структура JSON для значень, що надсилаються в тілі HTTP запиту POST /physical-model і POST /poincare-map і для отримуваних значень зазначена на рисунку 3.7;

```

1 {
2     [
3         {
4             "x":(double),
5             "y":(double)
6         },
7         ...
8     ]
9 }

```

Рисунок 3.7 – Структура JSON для значень, що надсилаються в тілі після HTTP запиту POST /physical-model і POST /poincare-map
POST / poincare-map – виконується запит з переданими початковими умовами для обчислення значень координат точок, що складають перетин Пуанкаре рідкої частинки, структура JSON для надісланих значень зазначена на рисунку 3.6 і для отримуваних значень зазначена на рисунку 3.7.

3.3. Програмні засоби реалізації

Spring – це фреймворк із відкритим кодом, що був створений Родом Джонсоном і був описаний в його книзі «Експертні розмови: J2EE Проектування і розробка». Spring був створений із метою адрееції складності розробки enterprise систем і дозволяє використовувати прості JavaBean для досягнення тих функціональних модливостей, що раніше були доступні лише при розробці з використанням

технології EJB. Але переваги Spring не обмежуються лише розробкою серверних програмних продуктів. Любі програми, що написані на мові Java, можуть використовувати Spring для того, щоб досягти спрощеності коду, зручності при тестуванні та зменшення зв'язності програмних компонентів.

В технології Spring під терміном `JavaBean` – термін, що використовується для описання будь-якого програмного компоненту програми. З цього слідує той факт, що Spring компоненти не обов'язково повинні строго слідувати специфікації `JavaBean`. Компонент Spring може бути любим типом `POJO`.

Фреймворк Spring надає широкий спектр функціональних можливостей. Але ключовими функціональностями, що він пропонує для розробників програмних продуктів на мові Java, є певний перелік, що слугує одній головній ідеї, яка визначає місію фреймворка Spring – Spring полегшує процес розробки на мові програмування Java.

Для цього Spring застосовує чотири наступні стратегії:

- полегшення і мінімалізація моментів ін'єкції залежностей Java застосунків за допомогою використання `POJO`;
- зменшення зв'язності програмних компонентів завдяки підходу `dependency injection` та орієнтацією на роботу з інтерфейсами;
- використання декларативного програмування через технологію аспектів і загальних конвенцій;
- видалення шаблонного коду за допомогою аспектно-орієнтованого програмування і `templates`.

Усі нові технології та підходи, що пропонуються фреймворком Spring так чи інакше зводяться до забезпечення одного з цих чотирьох цілей.

Під терміном «ін'єкція залежностей» у комп'ютерних науках розуміють складні підходи та патерни програмування. Але у випадку Spring, ін'єкція залежностей постає як просте та інтуїтивне явище. Завдяки його впровадженню, код створюваних програм стає значно простішим, зручним для його розуміння іншими розробниками, та легким до тестування.

Якщо ін'єкція залежностей дозволяє зменшувати зв'язність програмних компонентів системи, аспектно-орієнтоване програмування (AOP) дозволяє виділити

цілу функціональність, яка використовується скрізь в створюваній програмі, у окремий компонент, який можна повторно використовувати.

Аспектно-орієнтоване програмування часто визначається як техніка, що виконує розподіл задач у програмних системах. Системи, що складаються з декількох компонентів, кожен з яких відповідає за окрему частину функціональності. Але дуже часто виникає ситуація, коли компоненти виконують також сторонню функцію, не пов'язану з її основною.

Системні сервіси, такі як логування, управління транзакціями, управління авторизацією часто викликаються в таких компонентах, головною задачею яких є зовсім інша функціональність. Такі системні сервіси часто визначаються як наскрізні функціональності, тому що вони мають тенденцію до використання скрізь по всьому програмному продукті.

Зручно представляти аспекти, як шари, що покривають компоненти програмного застосунку, як зображено на рисунку 3.8. У своєму ядрі, програма складається з модулів, що реалізують головну бізнес-функціональність. За допомогою аспектно-орієнтованого програмування постає можливість покриття головної функціональності шарами іншої функціональності.



Рисунок 3.8 – Схематичне зображення програмного компонента з переліком застосованих аспектів

Дані прошарки функціональності застосовуються декларативним чином у гнучкій манері. Ключовий бізнес-код навіть не здогадується про існування іншої функціональності, що до нього була застосована. Це є потужною концепцією, що зменшує забрудненість стороннім кодом головних бізнес-компонентів.

Нижче наведений повний цикл створення компоненту JavaBean у Spring:

1. інстанціювання;
2. запис значень атрибутів;
3. виконання методу `setBeanName()`, якщо компонент реалізує інтерфейс `BeanNameAware`;
4. виконання методу `setBeanFactory()`, якщо компонент реалізує інтерфейс `BeanFactoryAware`;
5. виконання методу `setApplicationContext()`, якщо компонент реалізує інтерфейс `ApplicationContextAware`;
6. пре-ініціалізація за допомогою класів, які реалізують інтерфейс `BeanPostProcessor`;
7. ініціалізація `JavaBean` викликом методу `afterPropertiesSet()`;
8. виклик `init`-методу;
9. пост-ініціалізація за допомогою класів, які реалізують інтерфейс `BeanPostProcessor`;
10. `JavaBean` компонент готовий до використання.

3.4. Методика роботи користувача з програмою

Щоб розгорнути на локальному середовищі програмне забезпечення необхідно мати встановлений `Java Runtime Environment`. Виконувати деплой сервлетів немає необхідності, оскільки контейнер сервлетів `Apache Maven` вже є вбудованим у `JAR`-файл. Також користувач повинен мати встановлений веб браузер.

У створеному програмному забезпеченні присутній лише один файл – «`app.jar`». Також, у разі успішного запуску даного програмного забезпечення на хостингу, не буде виникати необхідності у жодних файлах на локальному середовищі, окрім веб-браузера.

Мінімальні вимоги до локального середовища:

- процесор класу `AMD Athlon 64` чи `Intel Core i3` з тактовою частотою не менше `1,3 GHz`;
- об'єм оперативної пам'яті (`RAM`) – не менше `4 GB`;
- об'єм жорсткого диску – не менше `512 MB`;
- об'єм відеопам'яті – не менше `512 MB`;

- встановлений браузер, що підтримує функціональність EcmaScript6 і html5.

Для початку роботи із застосунком необхідно двічі натиснути на файл «app.jar», розгорнувши таким чином сервер застосунків у локальному середовищі користувача. Далі необхідно перейти за адресою <http://localhost:9001/> у веб-браузері.

Далі, у вікні браузера з'явиться головна сторінка програми, що зображена на рисунку 3.9. На даній сторінці вказана тема магістерської роботи «Моделювання процесів перемішування рідин вихровими структурами у колі». По центру зображений схематичний малюнок вихору, у правому нижньому кутку від малюнку вказані дані про студента, що вів розробку даного програмного забезпечення.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕМІШУВАННЯ РІДИН ВИХРОВИМИ СТРУКТУРАМИ У КОЛІ



Розробив студент ТВ-371мп
Кошлатий Микола Леонідович

Фізична траєкторія

Фазова траєкторія

Перетин пуанкаре

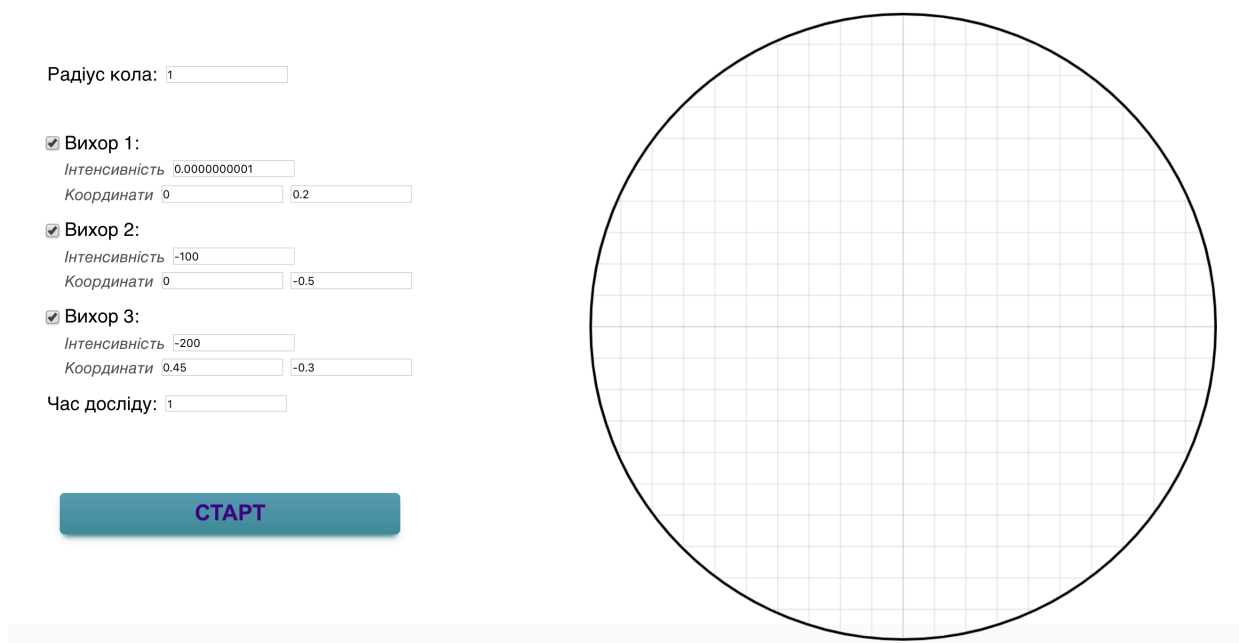
Рисунок 3.9 – Головна сторінка програми

Знизу розміщені три кнопки:

- «Фізична траєкторія» - у разі натиснення на дану кнопку буде виконаний перехід на сторінку моделювання фізичних траєкторій системи вихорів у круговій площині;
- «Фазова траєкторія» - у разі натиснення на дану кнопку буде виконаний перехід на сторінку моделювання фазових траєкторій вибраної рідкої частинки у системі вихорів в круговій площині;

- «Перетин Пуанкаре» - у разі натиснення на дану кнопку буде виконаний перехід на сторінку моделювання перетину Пуанкаре для вибраної рідкої частинки у системі вихорів в круговій площині;

При натисненні на кнопку «Фізична траєкторія», у вікні браузера буде зображений наступний зміст, як вказано на рисунку 3.10.



Радіус кола:

☒ Вихор 1:
 Інтенсивність
 Координати

☒ Вихор 2:
 Інтенсивність
 Координати

☒ Вихор 3:
 Інтенсивність
 Координати

Час досліду:

СТАРТ

Рисунок 3.10 – Сторінка побудови фізичної траєкторії

Тут можна спостерігати поля для введення початкових даних:

- радіус кругової площини, в якій відбуватиметься процес перемішування системою вихорів;
- прапорці для визначення кількості вихорів, що будуть виконувати перемішування рідини;
- значення інтенсивностей для кожного з вихорів;
- значення початкових координат для кожного з вихорів;
- час досліду, який буде виконуватися моделювання процесів перемішування рідини вихоровими структурами.

В даному програмному продукту було виконано попередню перевірку вхідних значень на їхню валідність. У тому разі, коли користувач захоче ввести від'ємні значення для радіуса кола, або часу виконання досліду, при натисненні на кнопку «Старт» зверху буде зображено вікно із повідомленням про введені хибні початкові значення. Приклад для випадку введення від'ємного радіуса зображено на рисунку

3.11. Також виконується схожа перевірка для випадків введення початкових координат, що знаходяться поза межою кругової площини.

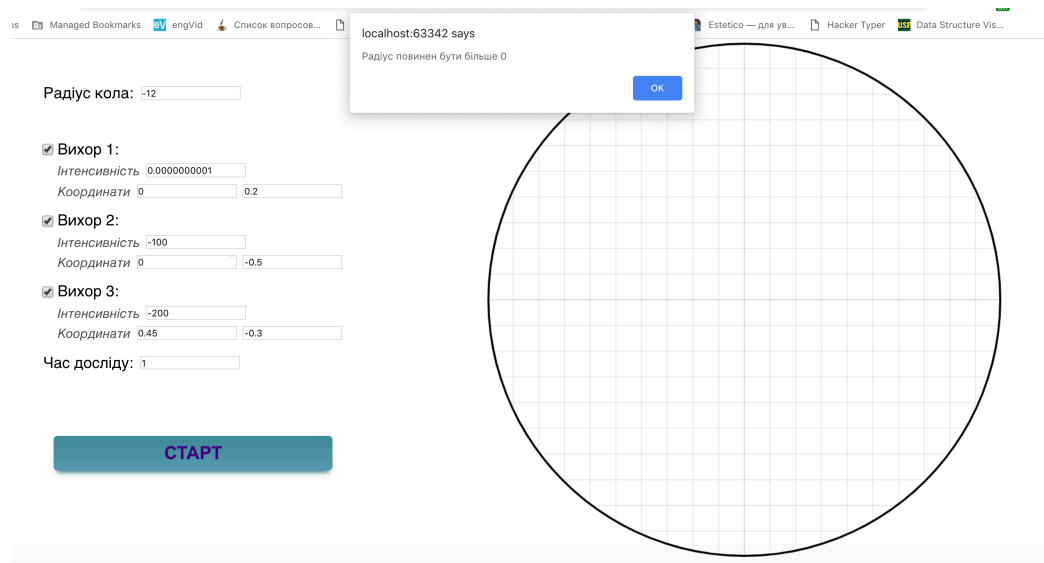


Рисунок 3.11 – Скріншот повідомлення про помилкові введені значення

У правій частині вікна зображено координатну площину на якій знаходиться кругова площина, де будуть виконуватися процеси перемішування рідини системою вихорів.

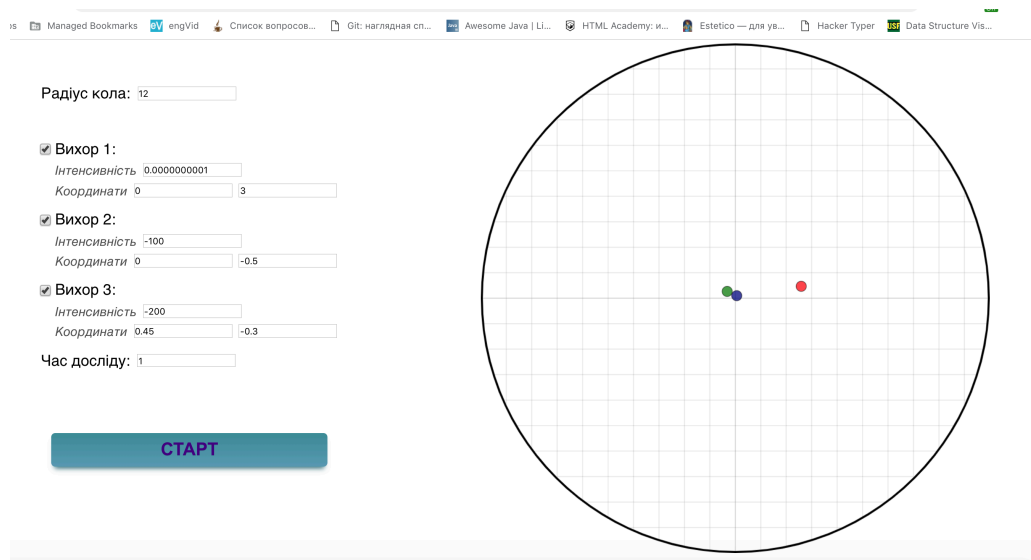
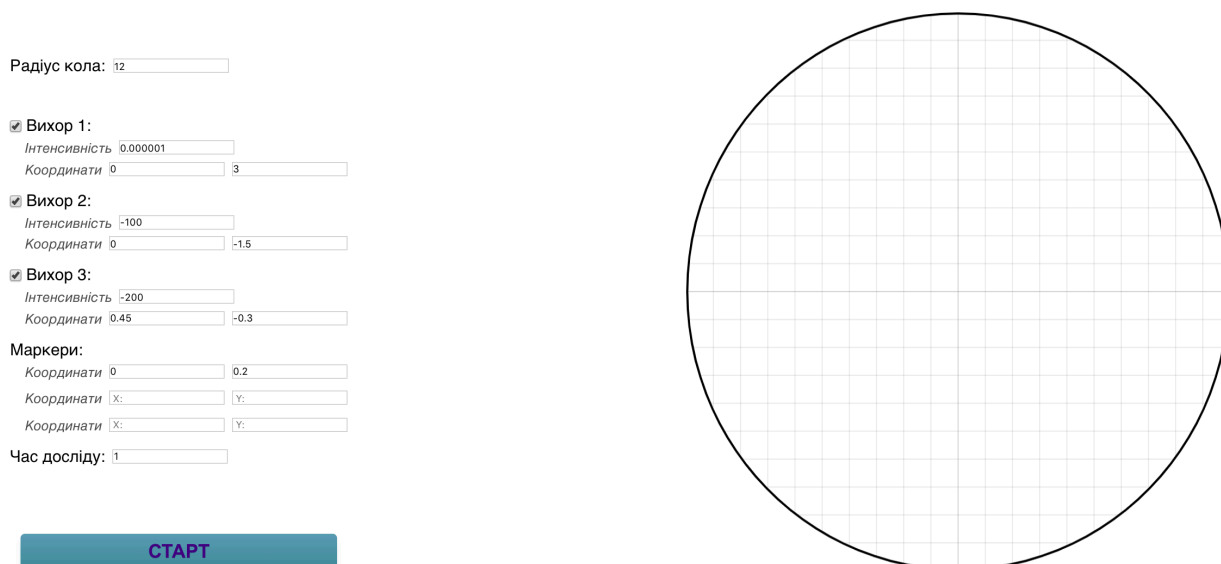


Рисунок 3.12 – Скріншот результату моделювання фізичних траєкторій вихорів

У разі натиснення в головній сторінці на кнопку «Фазова траєкторія» буде відкрита наступна веб-сторінка, скріншот якої зображено на рисунку 3.13.



Радіус кола: 12

☒ Вихор 1:
Інтенсивність 0.000001
Координати 0 3

☒ Вихор 2:
Інтенсивність -100
Координати 0 -1.5

☒ Вихор 3:
Інтенсивність -200
Координати 0.45 -0.3

Маркери:
Координати 0 0.2
Координати X: Y:
Координати X: Y:

Час дослід: 1

СТАРТ

Рисунок 3.13 – Сторінка побудови фазової траєкторії

Тут можна спостерігати поля для введення наступних початкових даних:

- радіус кругової площини, в якій відбуватиметься процес перемішування системою вихорів;
- прапорці для визначення кількості вихорів, що будуть виконувати перемішування рідини;
- значення інтенсивностей для кожного з вихорів, які виконують перемішування рідини;
- значення початкових координат для кожного з вихорів, які виконують перемішування рідини;
- значення початкових координат для обраних маркерів рідини, яка перемішується системою вихорів;
- час дослід, який буде виконуватися моделювання процесів перемішування рідини вихоровими структурами.

При введенні коректних початкових даних можна спостерігати наступні результати моделювання, що зображені на рисунках 3.14 і 3.15. На першому рисунку зображено результат побудови фазових траєкторій для обраних маркерів рідини.

Дані траєкторії не накладаються на будь-яку регулярну криву, з чого можна зробити висновок, що в області, де проходять дані фазові траєкторії присутній інтенсивний режим перемішування рідини. Наступний вигляд результату побудови можна спостерігати нижче.

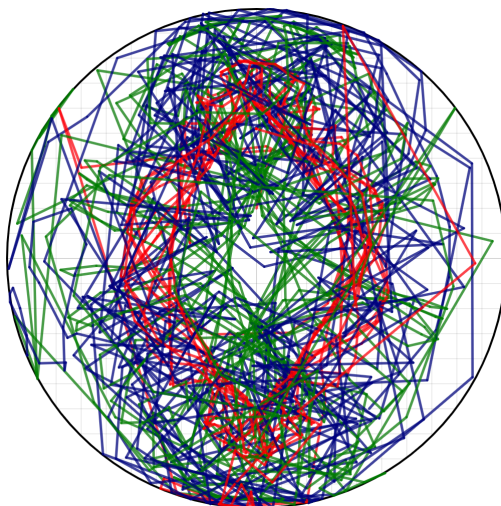


Рисунок 3.14 – Приклад фазових траєкторій для присутнього інтенсивного режиму перемішування

На другому рисунку зображено приклад фазових траєкторій для випадку відсутності інтенсивного режиму перемішування рідини. Даний висновок було зроблено спираючись на те, що фазові траєкторії формують регулярні криві.

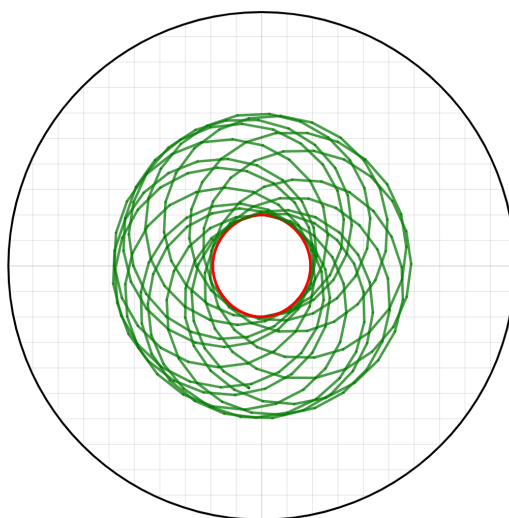
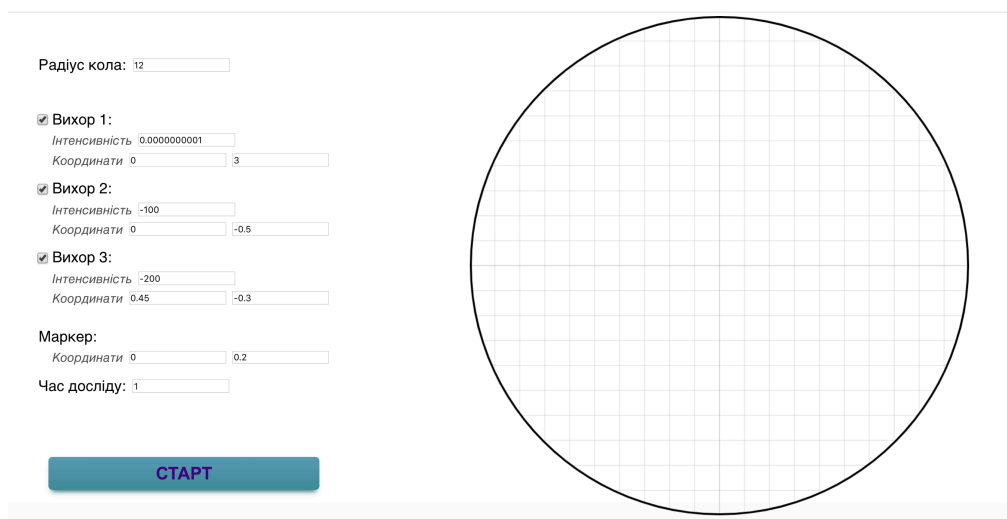


Рисунок 3.15 – Приклад фазових траєкторій для відсутнього інтенсивного режиму перемішування

У разі натиснення в головній сторінці на кнопку «Перетин Пуанкара» буде відкрита наступна веб-сторінка, скріншот якої зображено на рисунку 3.16.

Тут можна спостерігати поля для введення наступних початкових даних:

- радіус кругової площини, в якій відбуватиметься процес перемішування системою вихорів;
- прапорці для визначення кількості вихорів, що будуть виконувати перемішування рідини;



Радіус кола: 12

☒ Вихор 1:
Інтенсивність 0.0000000001
Координати 0 3

☒ Вихор 2:
Інтенсивність -100
Координати 0 -0.5

☒ Вихор 3:
Інтенсивність -200
Координати 0.45 -0.3

Маркер:
Координати 0 0.2

Час дослід: 1

СТАРТ

Рисунок 3.16 - Сторінка побудови перетину Пуанкаре для обраного маркеру рідини на круговій площині

При введенні коректних початкових даних можна спостерігати наступні результати моделювання, що зображені на рисунках 3.17 і 3.18. На першому рисунку зображено результат побудови перетину Пуанкаре для обраного маркеру рідини.

Дані точки перетину формують невпорядковану множину, що заповнює певну область, з чого можна зробити висновок, що в області, де розташовані дані точки присутній інтенсивний режим перемішування рідини.

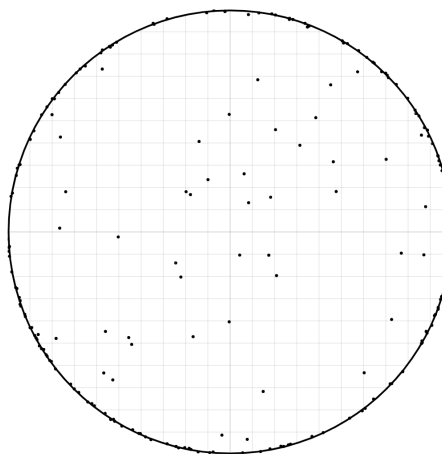


Рисунок 3.17 – Скріншот для випадку побудови перетину Пуанкаре для присутнього інтенсивного режиму перемішування рідини

На другому рисунку зображено приклад перетину Пуанкаре для випадку відсутності інтенсивного режиму перемішування рідини в точці маркеру рідини. Даний висновок було зроблено спираючись на той факт, що множина точок даного побудованого Перетину складається зі скінченної кількості та не збільшується зі збільшенням часу проведення моделювання.

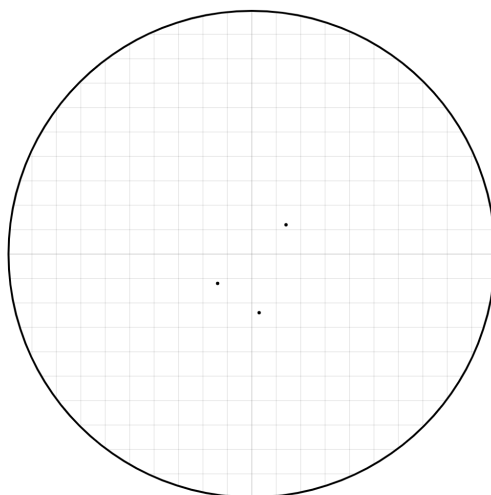


Рисунок 3.18 - Скріншот для випадку побудови перетину Пуанкаре для відсутнього інтенсивного режиму перемішування рідини

Висновки до розділу 3

1. Було проведено аналіз функціональних можливостей створюваного програмного забезпечення та створено функціональну модель системи моделювання процесів перемішування рідини.

2. Було виконано дослідження сценаріїв роботи зі створюваним програмним продуктом, які були узагальнені в діаграмі прецедентів для роботи користувача зі створеною системою моделювання процесів перемішування рідини.

3. Було розроблено та обґрунтовано архітектуру створюваного програмного продукту. Наведено API, який використовується при роботі з даним програмним продуктом.

4. Було наведено огляд технологій і засобів розробки, що використовувалися при проектуванні даного програмного забезпечення.

5. Продемонстровано функціональні можливості створеного програмного продукту:

- валідація введених початкових даних;
- кешування введених початкових даних;
- моделювання руху вихорів на круговій площині;
- побудова фазових траєкторій для маркерів рідини;
- побудова перетину Пуанкаре для маркеру рідини.

4. РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

Стартапом називають новостворену компанію, що перебуває ще тільки на етапі власного розвитку, проте вона має високий потенціал до зростання за рахунок інноваційних ідей, що вона пропонує ринку. Планується, що завдяки даним ідеям, дана компанія буде здатна запропонувати найбільш конкурентний на ринку продукт, послугу, модель серед існуючих аналогів. Принципова відмінність компаній, що перебувають у стані стартапу є недостатнє на даний момент фінансування і, звідси, пошук інвестицій, зазвичай, зі сторони венчурних капіталістів та інвесторів, що спеціалізуються на ризикових активах. Дані компанії не обов'язково повинні бути відноситися до галузі інформаційних технологій, існує велика кількість медичних стартапів, стартапів автомобілебудівництва тощо..

Компанії-стартапи, як модель малого підприємництва із високим значенням ризиків, зазнали значного поширення протягом останніх двох десятиріч завдяки новітнім досягненням у сфері комунікації, процесам глобалізації та численній кількості успішних прикладів. Розповсюдження інтернету як засобу спілкування, переговорів, маркетингу, а також майданчику для продажу продукції дозволяє підприємцям не так складно, як раніше, ідентифікувати потенційних споживачів та інвесторів, виконувати пошук матеріальних і нематеріальних ресурсів, спрощує процес перетину кордонів поміж ринками різних країн. Інтернет по праву можна вважати ключовою складовою інноваційної економіки стартап-підприємств, оскільки за рахунок мобільності, гнучкості та високою розповсюдженості для комунікації число інноваційних продуктів збільшується.

У той же час створення і розбудова даних підприємств супроводжується високим значенням ризиків, успіху досягає лише невелика частина стартапів, за останньою статистикою приблизно десять-двадцять відсотків. Ідея стартап-проекту, сама по собі, не має майже ніякої ринкової цінності: перед менеджерами підприємства постає задача трансформування інноваційної ідеї у ефективну ринкову бізнес-модель, яка складає у собі визначення концепції товару або послуги, що надається даним підприємством, ідентифікацією потенційних користувачів кінцевого продукту даного стартапу за існуючого стану на ринку.

Розвиток і впровадження ідей стартап-підприємства на ринок повинен передбачати виконання наступного переліку пунктів, за допомогою яких стає можливим визначення ринкових перспектив стартапу, обрання режиму та фундаментальних засад, на яких базуватиметься організація виробництва проведення фінансового аналізу.

Проведення ризик-аналізу а також дії щодо розповсюдження кінцевого продукту посеред потенційних споживачів і стратегію для успішного залучення фінансових ресурсів інвесторів. Нижче наведено необхідний маркетинговий аналіз для даного стартапу. У межах цього етапу:

1) буде проектуватися опис власне інноваційної ідеї стартапу а також обиратимуться головні напрямки з можливостей для застосування проектованого продукту, буде проведено аналіз його відмінностей від продуктів конкурентів і інших схожих;

2) будуть аналізуватися можливості та перспективи щодо реалізації ідеї стартап проєкту;

3) спираючися на аналіз поточного станку ринкових пропозицій буде розроблятися перспективна стратегія із ринкового просування проектованого продукту.

4.1. Опис ідеї проекту

Нижче наведено наступні дані, що становлять опис цього продукту:

1) зміст ідеї, яка є визначальною для створення стартап підприємства, описаного в даному розділі;

2) перспективні напрямки її впровадження;

3) вигоди, якими буде наділений користувач продукту або послуги стартап-проекту відносно усіх сфер застосування

4) ключові переваги перед існуючими конкурентами.

Зміст перших трох пунктів зображено в табличному вигляді (таблиця 4.1) а також будуть надавати достатнє розуміння змісту поданої інноваційної ідеї а також перспективні ринкові ніші, для яких потрібно надалі виконувати пошук потенційних груп кінцевих користувачів.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створено систему моделювання процесів перемішування рідини в сферичних порожнинах можна впроваджувати для використання у реальних промислових роботах і дослідницьких інституціях	1. Використання в підприємствах, де використовують засоби з перемішування рідин	Можливість збільшення енергоефективності процесу перемішування, що зменшить витрачені ресурси на дану дію
	2. Використання в дослідницьких установах, що вивчають процеси перемішування рідин у сфері	Можливість розширити існуючий інструментарій для виконання досліджень із моделювання процесів перемішування рідин у сферичних площинах

Дослідження перспективних техніко-економічних характеристик для продукту (характеристики, які визначають відмінність даного продукту від вже запропонованих конкурентами продуктів) у порівнянні із уже запропонованими продуктами конкурентів повинно:

- 1) визначити присутніх техніко-економічних для ідеї;
- 2) вивчення потенційного переліку конкурентів (конкуруючих підприємств) або можливих аналогічних продуктів, які вже продаються на даний момент на цільовому ринку, та розуміння того, які техніко-економічних характеристики для ідеї створюваного проекту є критичними а також для уже існуючих продуктів або інших схожих;
- 3) виконати зрівняння для наступних характеристик: в інноваційній ідеї, що пропонується, досліджуються характеристики, які а) програють (W, слабкі); б) співставні (N, нейтральні); в) виграють (S, сильні) (таблиця 4.2).

Завдяки цьому списку для характеристик інноваційної ідею створеного стартап-проекту постає можливість визначення його відносної конкурентоздатності на ринку схожих продуктів.

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик проекту

№ п/п	Техніко- економічні характеристики ідеї	(Потенційні) товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтр. сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	3D CFD			
1.	Можливістю виконання локально без серверу	Надає можливість незалежного виконання на локальній машині	Потребує підключення до серверу конфігурацій			+
2.	Можливість виконання процесу моделювання з трьома вихорами	Враховано можливість моделювання перемішування трьома вихорами	Моделює перемішування максимум двома вихорами			+
№ п/п	Техніко- економічні характеристики ідеї	(Потенційні) товари/концепції конкурентів		W (слабка сторона)	N (нейтр. сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	3D CFD			
3.	Відображення розтягу обраного контуру рідини	Лише відображення переміщення точки рідини	Можливість дослідження розтягу кільцевого контуру на рідині	+		
4.	Зручність використання/орієн-	Зручний інтерфейс з	Зручний ін.-терфейс у		+	

	тованість на користувача	підтримкою усіх сучасних браузерів	вигляді віконного застосунку			
--	--------------------------	------------------------------------	------------------------------	--	--	--

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Далі було виконано аудит запропонованої технологічних засобів, що допоможуть у реалізації інноваційної ідеї стартапу (технологічних засобів побудови продукту). Для ідентифікації технологічної реалізації інноваційної ідеї проекту необхідно провести дослідження наступних складових (таблиця 4.3):

- 1) з використанням яких технологічних рішень буде виконано проектування та створення кінцевого продукту?
- 2) чи є потреба в створенні власних технологічних засобів?
- 3) наскільки розповсюдженими є технології, які планується залучити?

Згідно з проведеного дослідження у таблиці було записано висновки щодо існуючої перспективності конструювання даного програмного продукту з використанням обраних технологічних рішень. При проектуванні продукту було обрано наступні технологічні підходи, як серверна частина, написаний на мові програмування Java на платформі SpringBoot, а також клієнтська частина написана на мові програмування JavaScript завдяки їх поширеності, безкоштовності а також існуючими рішеннями для WEB-застосунків.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Створення програмного забезпечення для моделювання процесів пере-	Алгоритм руху точкових вихорів на круговій площині	Наявна	Доступна

	мішування рідини в сфері	Чисельний метод для розрахунку системи диференційних рівнянь	Наявна	Доступна
		SpringBoot	Наявна	Доступна
		JavaScript	Наявна	Доступна
Обрані технології реалізації ідеї проекту: алгоритми руху вихорів + алгоритм обчислення диференційних рівнянь + SpringBoot + JavaScript				

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Виконання аналізу ринкових можливостей для запуску стартап-проекту передбачає існуючі ринкові перспективи за теперішнього стану попиту/пропозиції на даний продукт. Необхідно спрогнозувати поведінку ринку при виході проектного продукту на нього, передбачити шляхи розвитку даного продукту. Не можна обійтися без аналізу попиту кінцевих користувачів й вивчення їхніх потреб.

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	750000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Помірно зростає
4	Наявність вхідних обмежень (вказати характер обмежень)	-
№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	-
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	18

Середню норму рентабельності в галузі було порівняно із пропозицією банківських послуг з депозитів, розміщення ОВДП. Відсотки, що пропонуються за

даними послугами є меншими, з чого виникає більша рентабельність у вкладанні грошей саме у даний проект.

Згідно дослідженням, висновки якого наведено у таблиці 4.4 можна дійти до висновку, що ринок є досить рентабельних для роботи на ньому з планованим стартапом продуктом.

Надалі були визначені потенційні можливі клієнтські групи, цільові сегменти ринку, на який планує заходити майбутній створюваний продукт, було визначено їхні основні характеристики а також було сформовано приблизний, наведений нижче, перелік вимог до створюваного товару для кожної з даних визначених цільових груп (таблиця 4.5).

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Програмне забезпечення для моделювання процесів перемішування рідини в сфері	Інженери-проектувальники промислових змішувачів, дослідники хаотичних процесів при перемішуванні в рідинах	Мета використання програмного забезпечення: для пошуку конфігурації з найбільшою інтенсивністю перемішування, для пошуку нових недосліджених станів рідини при перемішуванні системою визорів	Інтуїтивний інтерфейс користувача, достовірність моделювання, відмостійкість

Наступним, після розмежування груп зацікавлених користувачів, було виконано дослідження поточної ситуації на ринку: визнаєчно наступні фактори загроз, що треба приймати до уваги під час виходу на ринок зі створеним кінцевим продуктом.

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Вищий сутінь конкурентої переваги у аналогічних продуктів	Розробити додаткові характеристики створюваного програмного продукту, про які буде анонсовано лише після запуску у продаж. Покращення технічних характеристик створеної продукції. Обрати наступний тимчасовий прийом для залучення нових споживачів: зниження цін.
2	Відставання від стану розвитку технологій у даній сфері	Новий поштовх у розвитку технологій моделювання процесу перемішування, що нівелює конкурентоздатність створюваного продукту	Використання найновішого алгоритмічного апарату під час виконання моделювання процесів перемішування, адаптація до сучасних умов швидкими темпами
3	Зміна потреб користувачів	Зміна вимог до функціональних можливостей програм моделювання перемішування рідини системою вихорів	Розробити гнучку архітектуру, що дозволить в швидкі строки додати новий функціонал у продукт

Наступним, після розмежування груп зацікавлених користувачів, було виконано дослідження поточної ситуації на ринку: визнаємо наступні фактори можливостей, що треба приймати до уваги під час виходу на ринок зі створеним кінцевим продуктом.

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	Відсутність програмного забезпечення з даними характеристиками на ринках країн, що розвиваються	Локалізація створюваного продукту до особливостей нововідкритих ринків.
№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
2	Поява біль сучасних методів розрахунку	З'являться нові методи розрахунку, які будуть забезпечувати більшу точність при передбаченні поведінки вихорів	Застосувати дані алгоритми при виконанні обчислень у створюваного програмному забезпеченні
3	Поява нових критеріїв ідентифікації хаотичних станів систем	З'являться нові критерії визначенню хаотичності рухів	Передбачити можливість додавання побудови нових критеріїв визначення хаотичних рухів

Нижче виконано дослідження існуючої пропозиції: виконано ступеневий аналіз конкуренції на ринку (таблиця 4.8).

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Конкуренція: чиста	На ринку присутня невелика кількість компаній,	Необхідно проводити аналіз якості продукту,

	товари яких мають відмінності.	підвищувати його характеристики
2. Рівень конкурентної боротьби: транснаціональний	Конкуренти присутні на ринках декількох країн	Необхідно проводити дослідження відмінностей правил гри на ринках інших країн
Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
3. Галузева ознака: внутрішньогалузева	Продукт призначений для галузі промисловості, що виконує перемішування в рідинах	Відстежування потреби виконання перемішування рідин у інших галузях
4. Конкуренція за видами товарів: товарно-видова	Конкуренція спостерігається між самими продуктами	Вивчення недоліків і переваг продуктів конкурентів
5. Характер конкурентних переваг: неціновий	Конкуренті переваги визначають функціональністю продуктів поруч із оптимальною ціною на них	Передбачення пропозиції ніким не пропонованої раніше функціональності
6. Інтенсивність: не марочна	Роль імені бренду на даному ринку не є вирішальним	Постійне просування та реклама нашого бренду

Нижче було виконано дослідження з існуючої конкуренції в даному сегменті ринку за моделлю М. Портера (таблиця 4.9).

Згідно з висновків проведеного дослідження в таблиці 4.9 можна дійти до думки, що даний сегмент ринку не містить критичний ступінь стану конкуренції, і на ньому є можливість заробляти. Далі визначено необхідні властивості, якими повинен

володіти проєкт, для того щоб бути достатньо ринково успішним на даному сегменті ринку.

Дані положення спричинили наступний перелік факторів для конкурентоспроможності продукту. На базі вивчення конкуренції, зробленого в таблиці 4.9, а також з огляду на властивості інноваційної ідеї стартапу (таблиця 4.2) а також потреб потенційних користувачів (таблиця 4.5) і існуючих чинників маркетингових дій (таблиці 4.6, 4.7) було наведено наступні фактори для конкурентоспроможності у таблиці 4.10.

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Навести перелік прямих конкурентів	Визначити бар'єри входу в ринок	Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загроз з боку замінників
	3D CFD, 911 Metallurgist	Присутність конкурентів на ринку	-	Визначення переваг кожного продукту	Перевірена часом якість продуктів, проведене масштабне просування продуктів
Висновки:	Присутня конкуренція на ринку продуктів моделювання процесів перемі-	Існує можливість успішного виходу на ринок, незважаючи на аналоги Час	-	Інтуїтивний інтерфейс користувача, достовірність моделювання, відмостійкість продукту	Потреба у підтримці рівня якості продукту відповідно до конкурентів

	шування рі- дин	закріплення – 10 місяців.			
--	--------------------	------------------------------	--	--	--

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкуренто- спроможності	Обґрунтування (перелік чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Ціна	Доступніша ціна збільшує кількість потенційних клієнтів
№ п/п	Фактор конкуренто- спроможності	Обґрунтування (перелік чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
2	Орієнтованість на кінцевого користувача	Продукт орієнтований на взаємодію з клієнтом
3	Адаптованість під конкретні цілі кінцевих споживачів створеного продукту	Ширше коло споживачів, для яких може бути використаний ПП

Згідно розглянутих факторів конкурентоспроможності (таблиця 4.10) було виконано порівняльне дослідження сильних та слабких сторін стартап-проекту (таблиця 4.11).

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з розроблюваним проектом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Ціна	13					+		
2	Зручність при роботі зі створеним продуктом	10				+			

3	Відповідність до існуючих потреб кінцевих споживачів	20		+					
---	--	----	--	---	--	--	--	--	--

Останньою частиною проведеного ринкового аналізу можливостей просування стартап-проекту є проведення SWOT-аналізу (квадрату аналізу сильних сторін (Strength), слабких сторін (Weak), перешкод (Troubles), можливостей (Opportunities) (дивись таблицю 4.12) на базі визначених перешкод і можливостей даного сегменту ринку, сильних і слабких сторін продукту (таблиця 4.11). Наступний список економічних загроз та економічних потенційних можливостей було створено на базі дослідження чинників загроз та чинників можливостей, що існують на даному сегменті ринку.

Перешкоди та можливості, згідно цього аналізу, являються прогнозними станами після дії даних чинників, і, на відміну від них, ще не стали складовою частиною ринку і мають певну ймовірність їхнього нездійснення. Для прикладу: фінансова криза на даному сегменті ринку – чинник, який може спричинити збільшення питомої ваги ціни на кінцевий продукт, що у свою чергу спричиняє збільшення конкуренції посеред учасників ринку.

Таблиця 4.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту

<u>Сильні сторони:</u> Ціна Зручність при роботі зі створеним продуктом	<u>Слабкі сторони:</u> Відповідність до існуючих потреб кінцевих споживачів
<u>Можливості:</u> Конкуренція Поява нових методів розрахунку траекторій вихорів Поява нових критеріїв визначення хаотичності рухів	<u>Загрози:</u> Відставання від стану розвитку технологій у даній сфері Зміна потреб користувачів

На базі попереднього SWOT-аналізу, зазначеного вище, визначено перелік можливих наступних сценаріїв ринкової поведінки (кейси ринкових заходів) для

запровадження програмного продукту та його успішного виведення на цільовий ринок споживачів, а також визначено приблизний проміжок часу, за який даний продукт займе свою частину ринку, спираючись на можливі заходи прямих компаній із аналогічними продуктами, які потенційно вийти на ринок. Перелік цих сценаріїв поведінки ринку був вивчений із перспективи дедлайнів запровадження таких заходів а також перспективи залучення нових фінансових ресурсів від зацікавлених інвесторів (таблиця 4.13).

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Терміни реалізації
1	Реалізація програмних продуктів безкоштовно, для охоплення сегменту ринку	35%	10 місяців
2	Реалізація програмного продукту з безкоштовним випробувальним періодом і повним аккаунтом за гроші	80%	18 місяців
№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Терміни реалізації
3	Реалізація хмарних технологій на базі Amazon Web Services, що виконуватимуть обчислення	70%	16 місяців

У якості обраної стратегії входу на ринок було обрано варіант №2.

4.4. Аналіз ринкової стратегії проекту

Для розробки діючого плану з виходу на сегмент ринку було виконано аналіз профілю потенційних споживачів, їх готовність придбати запропонований продукт, ступінь попиту, його інтенсивність.

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Компанії, діяльність яких пов'язана з процесами перемішування в суцільних середовищах	Висока	Помірний	Сильна	Середній рівень
2	Конструкторські бюро зі створення змішувачів рідин	Висока	Високий	Помірна	Помірно
3	Науково-дослідницькі інститути, що спеціалізуються на вивченні процесів перемішування рідин	Помірна	Високий	Помірна	Складно

Згідно дослідження профілів цільових груп потенційних споживачів програмного продукту, їхньої готовності сприйняти новий програмний продукт, значення орієнтованого попиту в межах даного цільового сегменту, його інтенсивність і простоти входу в даний сегмент, було обрано модель роботи з декількома сегментами споживачів.

Для цього було визначено наступну базову стратегію для розвитку.

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
----------	--------------------------------------	---------------------------	--	---------------------------

1	Реалізація програмного продукту з безкоштовним випробувальним періодом і повним аккаунтом за гроші	Аналіз ключових відмінностей між даними групами споживачів, створення адресної маркетингової стратегії для кожної	Гнучка багатокрокова цінова політика поступових оновлень, адресність створеного інтерфейсу користувача	Диференційований маркетинг
---	--	---	--	----------------------------

Далі було визначено базову стратегію конкурентної поведінки на даному сегменті ринку

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Так	Шукати нових	Ні	Закріплення на захопленій ніші ринку

Згідно з вимогами споживачів із конкретних груп до підприємства-виробника продукту та до власне кінцевого продукту (таблиця 4.5), а також з огляду на визначену базову стратегію розвитку (таблиця 4.15) а також базові стратегії конкурентної поведінки (таблиця 4.16) визначено стратегію позиціонування (таблиця 4.17), суть якої є у формуванні підсвідомих зв'язків у кінцевого споживача з брендом створюваного стартапу.

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власно-
-------	-------------------------------------	---------------------------	-------------------------------------	--

			ції власного стартап-проекту	го проекту (три ключових)
1	Інтуїтивний інтерфейс користувача, достовірність моделювання, відмостійкість продукту	Стратегія диференціації	Приведення перевірки співвідношення ціна/якість посеред конкурентів	Економія грошей; Надійний продукт; Компанія-інноватор;

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Було розроблену потенційно успішну маркетингову програму товару, який націлений на кінцевого користувача. Для цього у таблиці 4.18 було підведено підсумки результатів проведеного дослідження конкурентоспроможності продукту. Отримана концепція продукту це перелік функціональностей та ключових особливостей продукту.

Таблиця 4.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Зручність застосування	Інтуїтивність інтерфейсу продукту	Інтерфейс створеного продукту не потребує попереднього навчання для роботи з ним
2	Ефективність результату	Пошук конфігурації енергоефективної моделі перемішування рідини	Збільшення ефективності процесів перемішування рідин за рахунок ідентифікації хаотичного стану в досліджуваних системах
3	Незалежність від типу платформи	Гнучкість використання для різних операційних	ПП не має прив'язки до конкретної операційної системи, адже він використовує WEB-технології

Нижче викладено модель кінцевого продукту із трьома рівнями, в яких зазначається ключова інновація, яка пропонується даним продуктом. Також

проводиться огляд його функціональних переваг і пропозицій, вказуються особливості з його впровадження і реалізації.

1. На першому рівні відбувається опис задуму для даного продукту. Які інноваційні ідеї він несе, а також які задачі даний продукт здатен вирішувати новим інноваційним чином. Дані визначення дозволяють проводити подальше специфікацію для розроблюваного товару в якості продукту стартап компанії.
2. На даному рівні зазначаються деталі з реалізації продукту на сегменті ринку: в якій форм це буде виконуватиметься, що буде бачити перед собою користувач, перед момент придбання товару.
3. Третій рівень – товар із супроводом. На даному рівні зазначаються деталі з позиції, коли товар був уже придбаним користувачем, можливо певні розширення до товару, версії, акції, тощо.

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Зниження витрат часу та енергії на перемішування за рахунок ідентифікації умов системи, за яких присутнє інтенсивне перемішування		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Функція моделювання фізичної траєкторії вихору		
	2. Функція побудови фазової траєкторії вихору		
	3. Функція побудови перетину Пуанкаре		
	Якість: достовірність побудови математичної моделі, достовірність відображених критеріїв		
	Пакування: відсутнє		
	Марка: «VortexDynamicsMonitor»		
	До продажу: відсутнє		

III. Товар із підкріпленням	Після продажу: оновлення методів моделювання вихорів і розширення відображуваних критеріїв
Безкоштовного доступу до коду програми та обраних математичних методів надано не буде. Ідею буде захищено патентом	

Далі необхідно визначити ціну на кінцевий продукт. Для цього необхідно визначити існуючі цінові пропозиції серед продуктів-аналогів. Також необхідно провести аналіз рівня доходів потенційних користувачів, а також збільшення рівня їхніх прибутків у разі використання даного продукту. За можливості передбачення різних конфігурацій необхідним є встановлення нижньої та верхньої межі запропонованої ціни.

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	100\$	300\$	Перша цільова група має високий рівень власних доходів	100\$ - даний продукт не передбачає можливість різних функціональних конфігурацій

В подальшому виникає потреба у визначенні маркетингової системи реалізації товару стартапу.

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати поставальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Цільова група – компанії та дослідники які шукають способи підвищення ефективності	Налагодження зв'язків з кінцевим споживачем. Дослідження попиту на даному сегменті ринку. Стиму-	1	Продажа даного продукту на пряму без використання посередників

	процесу перемішування рідини.	ляція реалізації створеного продукту за допомогою маркетингових прийомів. Вивчення останніх підходів у рекламному бізнесі.		
--	-------------------------------	--	--	--

Далі необхідно визначити концепцію для маркетингових комунікацій компанії зі споживачем з метою продажу створеного продукту.

Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Цільова група – компанії та дослідники які шукають способи підвищення ефективності процесу перемішування рідини.	Бізнес-панелі, тематичні вебсайти, конференції, новини науки і техніки.	Приведення перевірки співвідношення ціна/якість по-серед конкурентів	<ul style="list-style-type: none"> створення позитивних асоціацій з продуктом у користувачів; покращення фінансових показників стартап-компанії; залучення нових груп споживачів; 	Зазначення високого рівня функціональності при набагато меншій ціні з можливістю використання на різних платформах

				· підтримка достатнього рівня продажу продукції у моменти кризових станів на ринку.	
--	--	--	--	---	--

У результаті даного дослідження була розроблена концепції з маркетингового просування створеного програмного продукту з моделювання процесів перемішування рідини системою вихорів на круговій площині з можливістю ідентифікації станів інтенсивного перемішування рідини з визначенням їх місцезнаходжень.

Висновки до розділу 4

1. Проведено аналіз програмного продукту як можливого інноваційного продукту, на базі якого буде створено стартап.
2. Проведено аналіз ринкового стану вже існуючих подібних продуктів та потреб цільових користувачів програмного продукту.
3. Вивчено потенційні ризик-аналіз для потенційного бізнесу на базі стартап-проекту.
4. Визначено ціну кінцевого продукту, який буде запропоновано користувачеві.
5. Визначено економічні стратегії для розвитку стартап-проекту.
6. Було створено маркетингову стратегію для виходу на цільовий ринок.

ВИСНОВКИ

Згідно з результатів досліджень, що були проведені в магістерській роботі можна зробити наступні висновки, наведені нижче:

1. Проведено аналіз сучасної наукової літератури з проблеми перемішування рідин ламінарними течіями і проблеми еволюції нестійких нелінійних динамічних систем, яким притаманні хаотичні властивості. Визначено основні властивості, за якими ідентифікують хаотичність руху динамічних систем.

2. Визначена проблема ідентифікації інтенсивних режимів перемішування. Виконано огляд існуючих режимів процесів перемішування рідини у внутрішніх течіях.

3. Проведено аналіз існуючих підходів з ідентифікації областей інтенсивного перемішування нестислої рідини. Виявлені основні підходи до опису процесів переносу суцільними середовищами, основні фізичні моделі і математичне формулювання задач процесу перемішування рідини.

4. Наведено огляд чисельних методів розв'язку систем диференціальних рівнянь, описано алгоритм для методу Рунге-Кута-Фельберга та обґрунтовано його використання для обчислення значень критеріїв і станів системи, що буде змодельована.

5. Запропоновано алгоритм для виконання моделювання процесів перемішування виділених рідких частинок і побудови критеріїв для аналізу інтенсивного режиму перемішування рідини:

- внесення початкових умов і фізичних параметрів, що описують динаміку окремих рідких частинок у внутрішніх течіях нестислої рідини;
- вибір критерію або моделі для аналізу інтенсивного режиму перемішування рідини;
- обчислення фазової траєкторії руху рідких частинок і побудови перетину Пуанкаре у фазовому просторі з використанням чисельного інтегрування задачі Коші методом Рунге-Кута-Фельдберга;
- графічне відображення результатів обчислень.

6. Проведено функціональний аналіз створюваного програмного продукту, передбачено сценарії користування кінцевим користувачем із даним програмним застосунком.

7. Обґрунтовано вибір технологій та архітектурних рішень при створенні програмного продукту, наведено опис API, який використовується при надсиланні HTTP запитів до серверу, на якому виконується обчислення значень для змодельованої системи.

8. Розроблено програмне забезпечення, яке призначене для виконання моделювання процесів перемішування рідини системою вихорів на круговій площині з можливістю ідентифікації областей із присутнім інтенсивним режимом перемішування рідини.

9. Описано мінімальні вимоги до апаратного забезпечення при роботі з даним програмним продуктом, описано сценарій запуску для виконання входу в створену програму.

12. Було створено методики з користування даним програмним продуктом для кінцевого користувача. У даній методиці було продемонстровано перелік наступних функціональних можливостей створеного програмного продукту моделювання процесів перемішування рідини:

- валідація введених початкових даних;
- кешування введених початкових даних;
- моделювання руху вихорів на круговій площині;
- побудова фазових траєкторій для рідких частинок (маркерів);
- побудова перетину Пуанкаре для маркеру рідини.

13. Було виконано аналіз перспектив створеного продукту у якості можливого стартап-проекту, можливі стратегії його просування на ринку а також орієнтовну ціну за створений продукт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Derek AI., Weber M. Chaotic dynamics for beginners // Theoretical physics library inc. – 2009. – V. 18(6-9). - p. 746–754.
2. Лупиніс М.В. Екологічний моніторинг світового океану 2012 / М.В. Лупиніс, М. М. Рябоконь, // Рибні промисли у контексті сучасного світу. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – Т. 4, №2.
3. Райковский В. Н., Рустави К. С. Хаотическая динамика: Учебник для вузов. – М.: Москва-издат, 1994. – 535 с.
4. Гриньков В.Я. Моделирование динамики сплошных сред. Очерки // АцОК: Водоснабжений городских домов. – 2013. - №2. – С. 44-47.
5. Тепловые насосы. Инструкция к проектированию моделей // ЭСКО: Электронный журнал компании «Клининг ЛТД». – 2008. - №7 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.journal.cltd.com.ru/167>
6. Поворознюк Т. В. Теория компрессоров и насосных станций. – Хаоьков: Клуб «Реплика», 2016. – 709 с.
7. Тепловые насосы. Инструкция к проектированию моделей // ЭСКО: Электронный журнал компании «Клининг ЛТД». – 2008. - №7 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.journal.cltd.com.ru/219>
8. Подолянский А. А. Тепловые насосы в системе теплоснабжения зданий / А. А. Подолянский, А. Е. Дрозд // Промышленное приборостроение. – 2010. – Т. 40, №6. – С. 71-79.
9. Лунин М. Р., Санин В. И. Современные смесители – новые подходы// Тезисы 15-го Витебского форума по промышленным наукам, Витебск, 26-28 апреля 2014. – Витебск: Институт машиностроения им. А. В. Урюпина, 2014. – 428 с.; Ч.3.
10. Корчинский Д. И. Система перемешивания вязких жидкостей// Промышленная техника. – 2005. – Т. 33, №2. – С. 68-73.
11. Бубенчик А. Д. Технология энергосбережения: учебник для студентов / А. Д. Бубенчик, М. Ю. Бубенчик. – М.: ФОРУМ-ЕКСТРА-М, 2012. – 267 с.
12. Петрова М. Д., Гагарин В. В. Энергоэффективный метод перемешивания жидкостей разной природы // Инженерный обозреватель Николаева, 2011. – Т. 13

13. Прищеп А. Н. Использование двухступенчатого смесителя для домов/ А. Н. Прищеп, Н. Е. Ляшковский // Промышленная техника. – 2007. – Т. 22, №2. – С. 69-70
14. Баскаков К. М. Техничко-экономическое обоснование системы перемешивания газов «UStrema-2» / К. М. Баскаков, Е. В. Коваль // НАУКА, ПАТЕНТЫ И КОМПИЛЯЦИИ: статья Международной Томской конференции (25 августа 2008 г., г. Томск). В 2 ч. С. 8-11.
15. Писарчук Е.Е. Хаотическая механика под новым углом// Самиздат. 2002. – 24 с.
16. Джалелов А. Ц. Прогрессивные методики поиска интенсивных режимов перемешиваний/ А.Ц. Джалелов, Д. Н. Карамали, Г. Б. Вакур // Сборник Тюменского политехнического университета. Режимы перемешивания, 2018. – Т.306, №5. – С.170-172.
17. Alington G., Zoiteck M. A few topics about current status of creativity statements used with science. // Part E: Library topics of Educational Process, 1995. – V.273, №1. – P.12-31.
18. Гацько В. А. «Интеллектуальное перемешивание»: система интенсивного перемешивания // Руколь-Брянск. – 2008. - №5. – С.108.
19. Горбач М. М. «Интеллектуальное перемешивание»: система интенсивного перемешивания. Дополнения. // Руколь-Брянск. – 2005. - №5. – С.63.
20. Федишин С. С. Регулирование параметров систем моделирования процессов перемешивания в сплошных средах/ С. С. Федишин, А. С. Кобелев, // Журнал МИВСУ, 2007. - №3, Т.2. – С.418-424.
21. Автоматизация систем идентификации растяжения жидкостей/ разраб. В. В. Ионов. – М.: ООО «Ионотека», 2017. – 24 с.
22. Рядченко В. С. Устройства для регулировки подачи энергии в вихревых системах / В. С. Рядченко, Ю. В. Стратилат, А. И. Бенций // Столичный промышленник. – 2018. - №3-1. – С.44-49.
23. Кулик Л. Ф. Индивидуальное регулирование температуры в жидкостях котельни / Л. Ф. Кулик, П. Р. Курбас, Т. П. Петров-Водкин // Водоснабжение и современная техника, 1999. - №1. – С.10-11

24. Марценко Ю. М. Оценка энергетической эффективности систем перемешивания промышленных растворов / Ю. М. Марценко, Н. Г. Ермолаев, А. В. Левченко // Энергосбережение. Энергобезопасность. Промышленность, 2001. – №10 (92). – С.15-16.
25. Кармановский А. А. Автоматика процессов создания вихревых систем в круге: спецкурс/ А. А. Кармановский, Ю. Я. Прасолов, С. С. Раевский, С; Под ред. В. Н. Литриха. – М.: Стройиздат, 1996. – 169 с.
26. Каминский П. Н. Отопление и водоснабжение. В 3-х ч. Ч. 2. Водоснабжение. Изд. 2-е, перераб. и доп. / П. Н. Игоревин, А. Н. Щадило, В. Н. Миронов – М.: Стройиздат, 1997. – 413 с.
27. Гуржий А. А. Теплотехника: курс лекций / А. А. Гуржий, П. И. Огородников. – Киев: Издательский дом «Слово», 2003. – 254 с.
28. Нинина Е. Г. Энергопотери приборов. Справочник– М.: АВОК-ПРЕСС, 2012.
29. Терехин К. Ф. Гидромеханика в нескольких постулатах / Под. Ред. Ю. А. Шишуина, В. Г. Абалкина. – 2-е изд., пересмотр. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2016.
30. Siong Y., Kim W. Vortex Formula: Seeking the Area of an intence regimes with water systems // The Alghorithmus theasurus, 2015. – V.110, №8. – P.634-639.
31. Глебов В. Н. Концепция сечений Пуанкаре– М.: НТ Механикс, 2017. – 426 с.
32. Волкова С. В. Математический аппарат фазовых пространств/ С. В. Волкова, А. С. Кодлин, О. В. Минин, В. С. Кукушкин // Математические науки Симпозиум Пенза: в 2-х т. – Пенза: Изд-во ПИМ, 2012. – 1 т. – С.97-98.
33. Волкова С. В. GSM-телеметрия / С. В. Волкова, М. Ю. Длугин, А. С. Кирба, В. С. Пресман; Под. ред. Н. К. Юркова // Математические науки Симпозиум Пенза: в 2-х т. – Пенза: Изд-во ПИМ, 2012. – 1 т. – С.252-257.
34. Кошлатий М. Л. Проблематика досліджень хаотичних рухів у суцільних середовищах / Кошлатий М. Л., О. А. Гуржій // Концептуальні напрями розвитку наукових знань, м. Київ, 24-25 листопада 2018 р. У 3 т. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. – Т.2. – С.52.

35. Постоєнко Т. В. Моніторинг потоків рідини в просторах різної геометрії / Т. В. Постоєнко, // Концептуальні напрями розвитку наукових знань, м. Київ, 24-25 листопада 2018 р. У 3 т. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. – Т.2. – С.59.

36. Методичні вказівки до виконання самостійної роботи студентів з кредитного модуля «Математичні методи моделювання систем з розподіленими параметрами» для студентів напряму підготовки 6.050101 «Комп'ютерні науки» для спеціальності 8.05010102 «Інформаційні технології проектування» / Уклад.: О. А. Гуржій – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 18 с.

37. Чекмаренко А. А. Динамическая механика. Методические указания. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Гуманит. изд. центр АЛЬБАТРОС, 1993. – 163 с.

38. Shrueder O. Maximum vortexes regimes accounts 2th edition / O. Shrueder , G. Furlich, J. Kessidy – New York: Yale Education, 2018. – 129 p.

39. Simon R. Ross 3D Computer Geometry: A Mathematical Theses of Puankare cases. – Cambridge University Press, 2013. – 412 p.

40. Dilligan R. Torke 3D Vortex infiltration in solid phase spaces workarounds. – Cambridge University Press, 2016. – 414 p.

ДОДАТОК А

Моніторинг теплових потоків у сучасних приміщеннях різної
геометрії

Апробації

УКР.НТУУ"КПІ".ТВз7129мн_18М

Аркушів 5

2018

**Міжнародний центр наукових досліджень
(м. Київ)**

**МАТЕРІАЛИ МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-
ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ**

**«КОНЦЕПТУАЛЬНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ
НАУКОВИХ ЗНАНЬ»
24-25 ЛИСТОПАДА 2018 РОКУ
(частина III)**

**Київ
МЦНД
2018**

ЗМІСТ

Технічні науки	6
Nadryhailo T.Zh, Kosenko A.R. METHODS OF MODELING THE TRAJECTORY OF SOLID PARTICLES IN THE FLUID FLOW	6
Ведь В.В., Нікольський В.Є. ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ГАЗОРІДИННОГО ПОТОКУ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ ЦИРКУЛЯЦІЙНОГО АПАРАТУ ЗІ СТРУМЕНЕВО-ІНЖЕКЦІЙНИМ ГАЗОНАПОВНЕННЯМ	8
Демчук І.М. АНАЛІЗ ВПЛИВУ МІКРОХВИЛЬОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ПРОЦЕСИ СИНТЕЗУ НЕОРГАНІЧНИХ ТА ОРГАНІЧНИХ СПОЛУК В ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ РЕАКТОРАХ.....	10
Іванісова А.П. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ НА ТЕПЛООБМІННІ ПРОЦЕСИ В РІДИНІ.....	12
Івасишин Н.І. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ	14
Йовенко А.І. МЕТОДИ ВИБОРУ ЕФЕКТИВНОЇ АРХІТЕКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ	17
Кошлатий М.Л. ПРОБЛЕМАТИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ХАОТИЧНИХ РУХІВ У СУЦІЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩАХ.....	19
Книш І.С., ТЕНДЕНЦИИ РЫНКА СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ.....	20
Мурильов М.О. ТРИГЕР З ТРЬОМА СТІЙКИМИ СТАНАМИ.	21
Онопрієнко М.І. ПЕРЕВАГИ МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ ПІДПISУ КОРИСТУВАЧА	22
Поляков Р.М., Косухін О.В., Косухіна О.С. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ ДВИГУНАХ З УРАХУВАННЯМ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ	23
Франків М.М. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ СКЛАДАННЯ ПОВЕРХОВИХ ПЛАНІВ БУДИНКІВ НА ОСНОВІ РУКОПИСНИХ ЕСКІЗІВ	26
Цибенко М.Ю., Черняк Л.П., Титова О.О. РЕГУЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЦЕМЕНТНОГО КЛІНКЕРУ ЗМІНОЮ МІНЕРАЛОГІЧНОГО СКЛАДУ СИРОВИННОЇ СУМІШІ	28
Фізико-математичні науки	31
Сидоренко С.В. ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕНДЕНЦІЙ РІВНЯ ЦУКРУ У КРОВІ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ	31
Столярова С.С. ПОЛІМЕТНІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ПЕНТАПЛАСТУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ	32
Юридичні науки	34
Барабаш А.Г., Петренко О.Ю. ГРОМАДЯНИ ЯК СУБ'ЄКТИ ПРАВА ВЛАСНОСТІ НА ЗЕМЛЮ	34
Бойчук Д.В., ПРОГАЛИНИ КРИМІНАЛЬНОГО ПРОЦЕСУАЛЬНОГО КОДЕКСУ УКРАЇНИ В ЧАСТИНІ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕНЬ ЩОДО ВІДСТОРОНЕННЯ ВІД ПОСАДИ.....	36
Веха К.Ю. ОСОБИСТИЙ ОБШУК ОСОБИ У КРИМІНАЛЬНОМУ СУДОЧИНСТВІ УКРАЇНИ: ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ПРАВОВОЇ РЕГЛАМЕНТАЦІЇ	37

- Якщо Transaction Script вибраний з першої групи, ми можемо вибрати Gate Data Gateway або Row Data Gateway з другої групи:

$$x_1 + x_7 + x_8 \leq 1$$

- Якщо з першої групи обраний Table Module, нам дозволено вибирати тільки Table Data Gateway з другого:

$$x_3 + x_6 + x_7 + x_8 \leq 1$$

- Якщо модель домену обрана з першої групи, ми можемо вибрати Active Record або Data Mapper з другої групи:

$$x_2 + x_5 + x_6 \leq 1$$

Кошлатий М.Л.

студент ТЕФ, ТВЗ-71мп

НТУУ «Київський політехнічний інститут» ім. І.Сікорського

ПРОБЛЕМАТИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ХАОТИЧНИХ РУХІВ У СУЦІЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Стрімкий розвиток індустрії, загальна глобалізація, на сьогоднішній день, формують підвищену зацікавленість багатьох дослідників до питань екології і, зокрема, до проблеми перемішування в суцільних середовищах [1, 2, 3]. Дана наукова проблема безпосередньо зв'язана з галузями еволюції та прогнозування розповсюдження в світовому океані та атмосфері різних скалярних полів (солоності, забрудненості, ареал розповсюдження планктону, тощо). Також вона знаходить широке застосування в різних областях аеромеханіки та гідромеханіки, біології, геології та астрофізики, в хімічній, харчовій та фармацевтичній промисловості, нанотехнологіях.

Безперечно процес перемішування є дуже складним і нетривіальним. При створенні теорії перемішування доводиться розглядати, наприклад, розчинні та частково розчинні, хімічно активні та інертні рідини, повільні ламінарні течії, а також швидкі турбулентні течії [4, 5]. Отже, не дивно, що не існує єдиної теорії, здатної повністю пояснити процес перемішування в рідинах, і що прямими обчисленнями неможливо охопити усі важливі аспекти цього явища. Тим не менше певна інформація про процес перемішування може бути отримана як і за допомогою фізичних експериментів, так і за допомогою комп'ютерного моделювання.

Ключем до розуміння основних аспектів являється концепція «руху» - ідея з XVIII століття, пов'язана з ім'ям відомого математика Леонарда Ейлера. «Рух» рідини описувався математичним виразом, що вказувало, в якій точці простору буде знаходитись кожен елемент рідини влюбий момент часу в майбутньому. Якщо «рух» для даної течії відомий, то можливо було дізнатися практично про все й про переміщення даної течії. Наприклад, можливо обчислити сили та повну енергію, необхідну для досягнення необхідного ступеня переміщення в системі.

Оскільки поступові потоки не дозволяють досягти процесу ефективного перемішування, необхідно розглянути нестационарні двовимірні потоки. Нестационарні двовимірні потоки можуть привести до ефективного перемішування, адже в даному випадку відтік, пов'язаний з одною гіперболічною періодичною точкою, може пересікати область висхідного потоку цієї ж, або будь-якої іншої гіперболічної точки.

Дані перетини є характерними ознаками хаосу. З математичної точки зору система, в якій можуть виникати підкововидні структури або трансверсальні гомо- чи гетероклінні перетини, може рахуватися хаотичною. Подібна ситуація зустрічається та в інших фізичних системах. Прикладом цього може слугувати досліджувана Пуанкаре система, що складається з великої кількості часток, відносний рух яких описується детермінованими рівняннями [6]. Пошук таких областей інтенсивного перемішування представляє собою одну з важливих і складних задач у сучасній механіці рідини та газу [7, 8]. Необхідно відмітити, що єдиної концепції для пошуку таких областей в повільних, ламінарних течіях, у наш час не існує.

Однією з найбільших новин за останнє десятиріччя є відкриття явища детермінованого хаосу, суть якого полягає в тому, що повністю детермінована динамічна система при відсутності випадкових зовнішніх впливів починає вести себе непередбачено, випадковим чином. З цього приводу Ф. Мун у

передмові до книги пише: "... Нам говорили, якщо задані сили, що діють між частинками, а також початкові положення (умови) і швидкості частинок, то за допомогою досить великого комп'ютера можна передбачити (розрахувати) рух або розвиток системи для будь-якого моменту часу. Однак поява великих і швидких комп'ютерів не призвела до обіцяної нескінченної передбачуваності в динаміці ..." [9]. Сьогодні також стало відомо, що причина тому - хаотичні явища в динаміці, які супроводжуються високою чутливістю до початкових умов. Отже і надалі гостро постає задача побудови комп'ютерної моделі з достатньою точністю, що здатна відтворювати та прогнозувати хаотичні рухи в середовищах.

Література:

1. Биркгоф Г. Гидродинамика / Г. Биркгоф; пер. с англ. И.Б. Погребыского. -М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. - 244с.
2. Бровченко И.А. Численный лагранжевый метод моделирования распространения поверхностных пятен нефти океаническими течениями / И.А. Бровченко, Н.С. Городецкая, В.С. Мадерич // Прикладная гидромеханика. - 2002. - Т.76, № 4. - С.23-31.
3. Бэтчелор Дж. Введение в динамику жидкости / Дж. Бэтчелор; пер. с англ. В.П. Вахомчика и А.С. Попова. - М.: Мир, 1973. - 758с.
4. Вилля Г. Теория вихрей / Г. Вилля; пер. с англ. П.М. Гуменский. - М.Л.: Гостехиздат, 1936. - 266с.
5. Гельмгольц Г. Два исследования по гидродинамике / пер. с нем. СП. Чаплыгина. - М.: Палас, 1902. - 112с.
6. Дильман В.В. Методы модельных уравнений и аналогий в химической технологии / В.В. Дильман, А.Д. Полянин. - М.: Химия, 1988. - 304с.
7. Доронин Ю.П. Физика океана / Ю.П. Доронин. - Л.: Гидрометеиздат, 1978. - 296с.
8. Заславский Г.М. Введение в нелинейную физику: от маятника до турбулентности и хаоса / Г.М. Заславский, Р.З. Сагдеев. - М.: Наука, 1988. - 368с.
9. Зубов В.И. Устойчивость движения (методы Ляпунова и их применение) / В.И. Зубов. - М.: Высшая школа, 1984. - 232с.

Книш І.С.,
Студент

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ТЕНДЕНЦИИ РЫНКА СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ

Сейчас космический мониторинг относится к одной из наиболее успешно и динамично развивающихся инновационных отраслей. Космические снимки и космический мониторинг все активнее используются в самых разных отраслях хозяйства, государственном, региональном и муниципальном планировании и управлении. Необходимость использования данных ДЗЗ для повышения качества управления ни у кого сомнений не вызывает. Космический мониторинг позволяет получать однородную и сравнимую по качеству объективную информацию одновременно для обширных территорий, что практически недостижимо при любых наземных обследованиях. [2]

По данным консалтинговой фирмы с бизнес-анализа Prescient & Strategic Intelligence мировой рынок коммерческих спутниковых изображений оценивался в размере 2 411 800 000 долларов в 2017 году, и прогнозируется, что в течение 2018-2023 гг. этот показатель возрастет на 14,2%. (рис.1) Рост рынка в основном объясняется высокими достижениями в технологиях спутниковых изображений и расширением возможностей анализа геопространственной информации. [1]



Рис.1 Глобальный коммерческий спутниковый развитие (2013 - 2023).

ДОДАТОК Б

Моніторинг теплових потоків у сучасних приміщеннях різної геометрії

Акт впровадження

УКР.НТУУ"КПІ".ТВз7129мн_18М

Аркушів 2

2018